

NUNO MANUEL AIRES NUNES

**Reconhecimento de Padrões Estruturais,  
Construtivos e Materiais nas Pontes da Casa  
Eiffel em Portugal**

Orientador: Prof. Doutor Elói João Faria Figueiredo

**Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias**

**Faculdade de Engenharia**

**Lisboa**

**2018**



NUNO MANUEL AIRES NUNES

# **Reconhecimento de Padrões Estruturais, Construtivos e Materiais nas Pontes da Casa Eiffel em Portugal**

Dissertação defendida em provas públicas para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil na especialização de Construção e Estruturas no Curso em Engenharia Civil conferido pela Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias no dia 30/01/2019, perante o júri, nomeado pelo Despacho de Nomeação n.º 419/2018, de 28 de dezembro de 2018, com a seguinte composição:

Presidente: Prof. Doutor Francisco Faria Ferreira

Arguente: Prof. Doutor Júlio Appleton

Orientador: Prof. Doutor Elói João Faria Figueiredo

**Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias**

**Faculdade de Engenharia**

**Lisboa**

**2018**





# Agradecimentos

A conclusão desta dissertação marca uma relevante etapa da minha vida e neste momento especial gostaria de exprimir uma palavra de apreço a todos os que de uma forma decisiva me apoiaram e que, de algum modo, contribuíram para a elaboração deste trabalho.

O presente trabalho de dissertação foi desenvolvido sob a orientação do Professor Elói Figueiredo. Gostaria de expressar a minha profunda gratidão ao meu orientador, por acreditar nas minhas capacidades e ter aceitado este desafio, por todas as ideias de trabalho que surgiram ao longo das nossas conversas e pela total disponibilidade. De realçar o seu incentivo, mesmo nos momentos mais difíceis, a sua dedicação e confiança transmitidos ao longo desta etapa.

Agradeço, à Infraestruturas de Portugal, nas pessoas da Eng<sup>a</sup> Ana Isabel Silva, Eng.º Andrade Gil e do Sr.º Francisco Roseiro, pela informação do Arquivo Técnico disponibilizada para consulta.

Aproveito também para expressar o meu agradecimento a todos os professores da Faculdade de Engenharia da Universidade Lusófona, por todo o conhecimento transmitido e por contribuírem para ser um melhor profissional.

Aos meus queridos Pais, ao meu adorado Filho e a minha maravilhosa Companheira de vida, por terem acreditado em mim e me terem incentivado, pelos sacrifícios, e por me inculcarem a realização profissional e a necessidade de aprender constantemente mais, por todo o amor e dedicação.

Ao meu amigo, Paulo, por ter partilhado esta “viagem” comigo, por ter estado ao meu lado com a boa disposição de sempre.

Ao Singa, fiel amigo de quatro patas, por toda a companhia, mimos e saudáveis distrações, apesar de rabugento por vezes por falta de atenção.

A todos os colegas e amigos que me marcaram durante todo o meu percurso académico e que de uma forma ou de outra me ajudaram a ultrapassar alguns dos obstáculos.



# Resumo

Desde o tempo dos romanos que as pontes são desafios da Engenharia Civil para ultrapassar obstáculos na ligação entre dois locais, nomeadamente rios e vales acentuados. Na história, as pontes metálicas surgiram em massa com o advento das linhas ferroviárias no século XIX, onde Gustave Eiffel foi um dos grandes pioneiros na arte de construir pontes em ferro, pelo que o seu legado deve ser esclarecido para as gerações atuais e eternizado para as futuras.

Assim, esta dissertação pretende contribuir para um melhor conhecimento das pontes de ferro da Casa Eiffel. Para isso, este trabalho começa por retratar a evolução histórica das pontes metálicas e depois efetua um reconhecimento de padrões nas pontes metálicas da Casa Eiffel em Portugal, no que respeita à configuração estrutural, aos processos construtivos, aos materiais estruturais utilizados e, de forma sumária, aos métodos de cálculo e de dimensionamento.

Com base nos documentos da época, tanto nos próprios projetos das pontes como nos testemunhos refletidos na imprensa, foi possível compilar informação detalhada de cada uma das pontes metálicas realizadas em Portugal. Uma análise conjunta da informação permitiu identificar os principais materiais utilizados na superestrutura, o ferro pudelado e ferro fundido, e as suas características à época. A análise dos projetos originais permitiu constatar que a opção por um determinado tipo de elemento estrutural estava diretamente ligada ao nível de solicitação, como a utilização de treliça de rótula dupla, em tramos com solicitações mais elevadas, e de treliça em Cruz de Santo André, para os restantes casos. Desta análise foi ainda identificado um padrão na proporção entre os tramos das pontes metálicas, sendo o seu dimensionamento otimizado de modo a uniformizar os momentos máximos negativos. Foi também possível constatar o rigor no dimensionamento e na escolha dos materiais estruturais, bem como a evolução e a implementação pela Casa Eiffel de métodos construtivos inovadores, como os aplicados para a construção de fundações através de caixões de ar comprimido, a ancoragem dos pilares metálicos às suas bases e a utilização de treliças nas vigas principais.

Considera-se que o presente trabalho pode contribuir para um melhor conhecimento sobre a construção de pontes metálicas em Portugal e para uma melhor compreensão das obras existentes, com vista à sua futura conservação e reabilitação. Além disso, o mesmo pretende promover a consciência social, nacional e internacional, para a importância da conservação e da reabilitação do património histórico deixado pela Casa Eiffel.

**Palavras-chave:** pontes metálicas, Gustave Eiffel, treliças, soluções estruturais, reconhecimento de padrões



# Abstract

Ever since the Roman Empire, bridges have been representing challenges for engineers to overcome obstacles and connecting places, by overpassing rivers or steep valleys. In history, the metal bridges have developed significantly with the construction of the first railway lines, in the nineteenth century, where Gustave Eiffel was one of the greatest pioneers in the art of constructing iron bridges. Therefore, his legacy must be enlightened for the present generations and eternalized for the future generations.

This dissertation intends to contribute to a better knowledge of the Eiffel House iron bridges and so, it begins by describing the historical evolution of the metallic bridges, and then, performs pattern recognition of in the bridges constructed by the Eiffel House in Portugal. The pattern recognition addresses the structural configuration, the construction processes, the structural materials used and, briefly, the methods of calculation and design.

Based on the documents of that time, including the original bridge design documents and press reviews and testimonials, it was possible to compile detailed information on each of the metal bridges built in in Portugal. A joint analysis of the information allowed identifying the main materials used in the superstructure, the puddled iron and cast iron, and their characteristics at the time. The analysis of the original designs of the bridges, showed that the option for a certain type of structural element was directly related to the load level as, for example, the use of double ball-and-socket trusses, in sections with higher loads, and trusses in Saint Andrew's Cross, for the remaining cases. From this analysis, a pattern regarding the proportion between different bridge sections was also identified and was observed that the sections design had been optimised in order to standardize the maximum negative moments. It was also possible to attest the thoroughness in the design and in the selection of structural materials, as well as the implementation of innovative construction methods by the Eiffel House. Among these are, for example, the construction of foundations through compressed air coffins, the anchoring of metal pillars to their bases and the use of trusses in the main beams.

The present work aims to contribute to a better knowledge of the construction of metallic bridges in Portugal and for a thorough understanding of existing works, with a view to their future maintenance and rehabilitation. In addition, it aims to promote national and international social awareness of the importance of preserving and rehabilitating the historic heritage remaining from the Eiffel House.

**Keywords:** metal bridges, Gustave Eiffel, trusses, structural solutions pattern recognition.



# Índice

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento e justificação do tema.....	1
1.2. Objetivos da dissertação .....	3
1.3. Metodologia de investigação .....	4
1.4. Organização da dissertação .....	5
<b>2. ENQUADRAMENTO DAS PONTES METÁLICAS.....</b>	<b>7</b>
2.1. Enquadramento histórico dos caminhos de ferro em Portugal .....	7
2.2. As pontes ferroviárias em Portugal .....	11
2.3. Pontes metálicas .....	12
2.4. Considerações finais .....	19
<b>3. VIDA E PONTES METÁLICAS DE GUSTAVE EIFFEL EM PORTUGAL.....</b>	<b>21</b>
3.1. Considerações iniciais .....	21
3.2. Vida e obra de Gustave Eiffel .....	21
3.3. Estadia de Gustave Eiffel em Portugal .....	24
3.4. As pontes metálicas da Casa Eiffel construídas em Portugal .....	26
3.5. As pontes metálicas ainda existentes em Portugal .....	30
3.6. Considerações finais .....	35
<b>4. MATERIAIS, SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS E MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO.....</b>	<b>37</b>
4.1. Considerações iniciais .....	37
4.2. Materiais .....	38
4.3. Soluções construtivas .....	41
4.4. Métodos de dimensionamento e cálculos justificativos .....	55
4.5. Receção da obra - ensaios de carga das pontes .....	62
4.6. Considerações finais .....	63
<b>5. RECONHECIMENTO DE PADRÕES ESTRUTURAIS .....</b>	<b>65</b>
5.1. Considerações iniciais .....	65

5.2.	Identificação das características físicas e estruturais .....	65
5.3.	Utilização de tipos de treliça.....	69
5.4.	Parâmetros adimensionais.....	70
5.5.	Considerações finais .....	76
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>79</b>
6.1.	Sumário e conclusões.....	79
6.2.	Desenvolvimentos futuros .....	82
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>		<b>85</b>



# Índice de Figuras

Figura 1.1 - Assinatura de Gustave Eiffel do Projeto da Ponte do Dão [4] .....	2
Figura 2.1 - Cerimónia do lançamento da primeira pedra da construção da primeira linha de comboio em Portugal [6] .....	8
Figura 2.2 - Mapa da rede de caminhos de ferro portugueses no ano de 1895 [9] .....	10
Figura 2.3 - Ponte Iron Bridge [13] .....	13
Figura 2.4 - Viaduto de Xabregas [15] .....	14
Figura 2.5 - Vigas tipo em treliça para pontes metálicas, adaptado de [17] .....	16
Figura 2.6 - Secções tipo com recurso a rebitagem [18] .....	17
Figura 2.7 - Ponte Akashi Kaikyo [20] .....	20
Figura 3.1 - Ponte La Passerele na altura da construção (à esquerda) e atualmente (à direita) [26] .....	24
Figura 3.2 - Retrato de Marie Marguerite e Gustave Eiffel, com os seus filhos em Levallois-Perret [23] .....	24
Figura 3.3 - Mapa com a localização das pontes da Casa Eiffel [56] .....	29
Figura 3.4 - Vista da Ponte de Viana do Castelo durante a sua construção [36] .....	30
Figura 3.5 - Ponte de Viana do Castelo [60] .....	31
Figura 3.6 - Ponte Maria Pia na entrada em serviço [62] .....	32
Figura 3.7 - Vista atual da Ponte Maria Pia .....	32
Figura 3.8 - Planta do projeto original da Ponte do Alviela [41] .....	33
Figura 3.9 - Vista atual da Ponte do Alviela [63] .....	33
Figura 3.10 - Vista da Ponte da Praia na sua inauguração [65] .....	34
Figura 3.11 - Ponte da Praia .....	34
Figura 4.1 - Aspeto do ferro pudelado: heterogéneo anisotrópico e frágil [66] .....	39
Figura 4.2 - Pilares tubulares da Ponte de Barcelos [19] .....	41
Figura 4.3 - Pormenor de pilar metálico Ponte do Dão [4] .....	42
Figura 4.4 - Pormenor de amarração do pilar metálico [4] .....	43
Figura 4.5 - Pilar de alvenaria [64] .....	44
Figura 4.6 - Fundações realizadas através caixões de ar comprimido [68] .....	45
Figura 4.7 - Pormenor da fundação dos pilares [19] .....	46
Figura 4.8 - Pormenor da secção vazada dos encontros e a sua drenagem [4] .....	47
Figura 4.9 - Pormenor do reforço das vigas por chapas suplementares à secção constante [71] .....	48
Figura 4.10 - Pormenor de um banzo inferior reforçado com chapas suplementares [64] .....	49
Figura 4.11 - Aspeto de treliças duplas e montantes [19] .....	50
Figura 4.12 - Exemplo de tabela com secções de treliças em “T” e em “L” [64] .....	50
Figura 4.13 - Representação de aparelho apoio móvel (à esquerda) e fixo (à direita) [64] .....	51
Figura 4.14 - Aspeto de um rebite antes da sua utilização .....	52
Figura 4.15 - Processo de rebitagem [73] .....	53
Figura 4.16 - Patologia de rebites de cabeça redonda da Ponte do Dão .....	54
Figura 4.17 - Três fases do processo construtivo da Ponte Maria Pia [57] .....	54
Figura 4.18 - Sistema de lançamento de pontes [74] .....	55

Figura 4.19 - Identificação dos elementos constituintes de uma viga principal, adaptado de [64] .....	56
Figura 4.20 - Valores de sobrecarga de acordo com Circulaire du ministère des travaux publics aux préfets [75] .....	57
Figura 4.21 - Método de alternância de posições da sobrecarga [77] .....	57
Figura 4.22 - Cálculo do momento resistente [78] .....	58
Figura 4.23 - Verificação das barras das treliças ao esforço transversal .....	59
Figura 4.24 - Cálculo da compressão máxima suportada por um montante.....	60
Figura 4.25 - Modelo utilizado para o dimensionamento das longarinas na Ponte da Praia [64] .....	60
Figura 4.26 - Corte do tabuleiro da Ponte da Praia [64] .....	61
Figura 4.27 - Reprodução da série de preços das pontes da Linha da Beira Alta [79].....	62
Figura 5.1 - Dispersão do parâmetro de $\alpha$ .....	71
Figura 5.2 - Cálculo dos momento de uma carga distribuída de 1 kN/m na Ponte de Barcelos .....	73
Figura 5.3 - Modelo da Casa Eiffel do Viaduto do Criz.....	74
Figura 5.4 - Modelo com tramos iguais do Viaduto do Criz.....	75

# Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Evolução histórica dos elementos metálicos [16] .....	14
Tabela 2.2 - Tipos de treliça existentes nas Pontes metálicas em Portugal.....	16
Tabela 3.1 - Identificação, localização e principais referências bibliográficas das pontes metálicas da Casa Eiffel em Portugal.....	27
Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas do ferro pudelado [14] .....	39
Tabela 5.1 - Função, data da inauguração e estado atual das pontes da Casa Eiffel.....	66
Tabela 5.2 - Identificação de características estruturais e tipos de treliça .....	68
Tabela 5.3 - Parâmetro $\alpha$ .....	70
Tabela 5.4 - Parametro $\lambda_t$ .....	72
Tabela 5.5 - Valores de $\beta$ obtidos.....	73
Tabela 5.6 - Comparação de momentos máximos e soluções construtivas adotadas.....	76



# Listas de Abreviaturas e Símbolos

Todos os símbolos usados nesta dissertação são definidos quando aparecem no texto pela primeira vez. Para a conveniência do leitor, esta seção contém apenas os principais significados das siglas e símbolos comumente usados.

## **ABREVIATURAS**

ASCE	American Society of Civil Engineering
IP	Infraestruturas de Portugal
HML	Hemeroteca Municipal de Lisboa
CP	Caminhos de Ferro Portugueses
REFER	Rede Ferroviária Nacional
CP, E.P.E.	Comboios de Portugal
GPS	Global Positioning System

## **SÍMBOLOS**

$\sigma_{\text{elast}}$	Tensão de limite elástico
$\sigma_r$	Tensão de rotura
$\sigma_{\text{elast}}$	Deformação de rotura
$f_y$	Tensão de cedência
$f_u$	Tensão de rotura
E	Módulo de elasticidade
G	Módulo de distorção
Y	Peso volúmico
$\lambda_{10}$	Extensão última na direção da laminagem para o ferro pudelado
$\lambda_5$	Extensão última na direção da laminagem, para aços antigos



# Introdução

## 1.1. Enquadramento e justificação do tema

Na época que vivemos existe um interesse crescente na conservação e reabilitação do património histórico, quer seja a nível nacional como internacional. Do ponto de vista do património da Engenharia Civil, as obras de arte como pontes, viadutos, túneis, etc., assumem um papel de especial relevância, quer pela sua dimensão física quer pelo impacto visual e admiração que ultrapassa gerações.

A Casa Eiffel, nome pelo qual é conhecida em Portugal a empresa de Gustave Eiffel, teve um papel muito relevante na construção de pontes metálicas. Estas infraestruturas foram fundamentais na implementação e no desenvolvimento da rede ferroviária nacional na quase totalidade do território de Portugal Continental, com pontes na Linha do Minho, Linha do Douro, Linha do Norte, Linha da Beira Alta, Linha da Beira Baixa, Linha de Sintra e Ramal de Cáceres. A empresa de Gustave Eiffel nasceu em França, em outubro de 1868, à data sob a designação de “G. Eiffel & C<sup>ie</sup>” [1] [2], e contava como associados Gustave Eiffel e Théophile Seyrig. Este último, além da contribuição financeira, colaborou também com a sua competência técnica, sendo ele o responsável pelo gabinete de estudo que projetou a Ponte Maria Pia no Porto, uma das mais notáveis obras da empresa. O nome de “G. Eiffel & C<sup>ie</sup>” manteve-se até 1879 quando, com a saída Théophile Seyrig, Gustavo Eiffel decide mudar a denominação da empresa para “G. Eiffel”, nome que se manteve até 1890, ano em que transforma a empresa em sociedade anónima, sob a denominação de “Compagnie des Établissements Eiffel”. Por último, e após o escândalo e acusações na construção do canal do Panamá, Gustave Eiffel altera o nome para “Société de Constructions de Levallois-Perret” [1].

O património histórico construído e existente em Portugal e no mundo é vasto. Dado o número significativo de obras por si elaboradas, desde pontes, estátuas e edifícios, muitas foram as obras de referência e emblemáticas que ficaram para os dias de hoje, tais como: a Torre Eiffel - símbolo de Paris e da França, a estrutura metálica da Estátua da Liberdade - símbolo de Nova Iorque e dos Estados Unidos da América e a Ponte Maria Pia - símbolo incontornável na paisagem do Porto, e provavelmente, uma das pontes metálicas que mais condicionou a carreira de Gustave Eiffel, sendo o único monumento português a fazer parte da lista de grandes obras de engenharia da *American Society of Civil Engineering* (ASCE). Pode-se assim dizer que Gustave Eiffel teve o mérito de criar estruturas que definem o local onde foram implantadas e que são conhecidas em todo o mundo como referências estruturais, patrimoniais e culturais.

Devido aos desafios levantados nas obras realizadas pela Casa Eiffel, os projetos implementados acarretaram o desenvolvimento de novas soluções estruturais, fomentando assim a introdução de novos materiais, implementação de processos construtivos inovadores, que se traduziram na execução das suas obras de um modo mais célere e seguro, ultrapassando assim constrangimentos da técnica construtiva utilizada na época, sendo alguns desses processos construtivos utilizados ainda no presente.

Para além da obra, do ponto de vista pessoal, Gustave Eiffel teve uma ligação forte a Portugal, onde estabeleceu residência em Barcelinhos, freguesia do concelho de Barcelos. A partir desta localidade, Gustave Eiffel desenvolveu os projetos das construções realizadas nesse período em Portugal. Eiffel era engenheiro químico de formação, mas o título pelo qual assinava os projetos das pontes em estudo era “Engenheiro Construtor” (Figura 1.1). Depois da construção da Torre Eiffel, começou a ser conhecido pelo “Mágico do Ferro” [3].

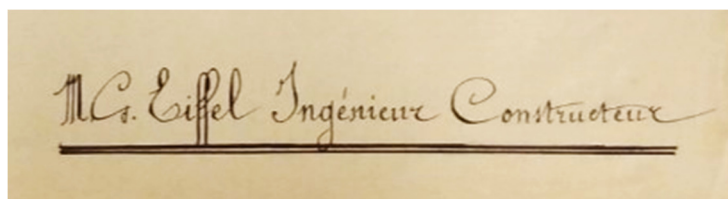


Figura 1.1 - Assinatura de Gustave Eiffel do Projeto da Ponte do Dão [4]

Contudo, devido ao pioneirismo assumido pelo Gustave Eiffel, muitas pontes e obras de arte foram, ao longo da história e por falta de informação, erradamente associadas ao seu nome e à sua imagem, levando a interpretações abusivas sobre o perfil construtivo do Eiffel. Assim, nesta dissertação, a vida e obra de Gustave Eiffel em Portugal é alvo de um estudo aprofundado, de forma a clarificar ideias e a desmistificar mitos. Portanto, esta dissertação pretende contribuir



para a identificação de padrões estruturais nas pontes metálicas de Gustave Eiffel em Portugal, ajudando também a conhecer melhor os materiais usados, as soluções construtivas inovadoras e os métodos de cálculo utilizados.

## 1.2. Objetivos da dissertação

Considera-se de todo o interesse, do ponto de vista da Engenharia Civil na área das estruturas, contribuir para o levantamento dos padrões estruturais das pontes metálicas da autoria de Gustave Eiffel em Portugal. Assim, pretende-se efetuar uma descrição de características particulares dos elementos constituintes das pontes construídas, desde os materiais utilizados, às suas configurações estruturais e os métodos de dimensionamento usados nos vários elementos e nas pontes como um todo, por forma a contribuir para o melhor conhecimento destas obras e contribuir para mais justos programas de manutenção e de reabilitação das pontes existentes.

Serão também estudados os elementos constituintes dos projetos de construção e seu dimensionamento através dos projetos originais da época da sua construção, recorrendo ao Arquivo Técnico do Departamento de Estruturas Especiais da Infraestruturas de Portugal (IP), que gentilmente colaborou e disponibilizou, todos os documentos existentes.

Assim, através de uma revisão histórica da vida e obra de Gustave Eiffel em Portugal, o presente trabalho pretende fazer um reconhecimento de padrões nas pontes da autoria da Casa Eiffel em Portugal, nomeadamente:

- Identificar todas as pontes realizadas por Gustave Eiffel em Portugal, com referência a publicações da época em que ocorreram as construções;
- Fazer um levantamento das principais características estruturais ao nível da forma e da geometria;
- Identificar o tipo e características resistentes dos materiais estruturais;
- Identificar os processos construtivos pioneiros da Casa Eiffel; e
- Identificar os métodos cálculo e de dimensionamento utilizados nos projetos da Casa Eiffel.

Pretende-se assim contribuir para um conhecimento mais aprofundado e exato das pontes atribuídas à Casa Eiffel já substituídas ou ainda existentes, por forma a promover uma reabilitação mais adequada, conservando assim o seu património histórico. Com uma melhor caracterização das pontes de Gustave Eiffel, espera-se também contribuir para uma melhor perceção e compreensão das obras existentes e sua consequente valorização como património histórico, almejando deste modo que em futuras reabilitações se respeite esse legado deixado

pelo tempo em que Gustave Eiffel esteve no nosso país. Espera-se igualmente que este trabalho sirva de referência, a nível nacional e internacional, contribuindo para um conhecimento mais pormenorizado das pontes da autoria da Casa Eiffel.

### **1.3. Metodologia de investigação**

Considerou-se importante, no desenvolvimento deste trabalho, começar por estudar o enquadramento histórico nacional e as inovações implementadas pelo Gustave Eiffel na construção de pontes metálicas. Do trabalho de pesquisa bibliográfica realizado, foi fácil identificar um conjunto de informações erróneas que atribuem a autoria da Casa Eiffel a outras pontes. Esta situação acontece principalmente devido ao simples facto de serem pontes metálicas, como na realidade existiram vários construtores de pontes metálicas na época. Por outro lado, constata-se, que a obra do Eiffel em Portugal, na sua generalidade, não foi alvo de estudo aprofundado, não se encontrando nenhuma lista fidedigna das obras da sua autoria e consequentemente, existe uma falta de atualização da informação das obras que sofreram reparações ou a sua total substituição por novas pontes sejam metálicas ou de alvenaria.

Para a elaboração da informação presente na dissertação, foram consultados os processos existentes e disponíveis para consulta do Arquivo Técnico da IP. Em paralelo, esta informação foi corroborada com informação das publicações da imprensa escrita da época da sua construção e posteriores, quando ocorreu, em alguns casos, a sua substituição devido a novas exigências do ponto de vista do material circulante. A consulta do Arquivo da IP mostrou-se essencial para uma correta interpretação da informação, que de outra forma seria impossível de obter. Mostrou-se igualmente de grande importância a consulta da Hemeroteca Digital, sítio da Hemeroteca Municipal de Lisboa (HML), a qual disponibiliza digitalmente e de acesso livre as publicações da imprensa escrita da época até aos dias de hoje, as quais documentam as inaugurações das pontes objeto da dissertação, a sua autoria, pormenores construtivos e gravuras ou fotografias das pontes.

Na consulta desenvolvida nos arquivos da IP, foi possível consultar contratos, cadernos de encargos, memórias descritivas e cálculos justificativos, onde se consultou e estudou as soluções utilizadas pela Casa Eiffel. Foi possível também perceber os materiais utilizados na sua construção e as suas características, os pormenores construtivos e os elementos constituintes das pontes como os aparelhos de apoio, as ligações entre as peças metálicas com a utilização de rebites e parafusos, e, ainda, os métodos de cálculo estrutural utilizados à época para o dimensionamento das pontes.

Finalmente, refira-se que estes trabalhos foram organizados de forma a que os resultados sejam dissemináveis através de uma comunicação em congresso nacional e de um artigo numa revista internacional com revisão por pares.

## 1.4. Organização da dissertação

A presente dissertação está organizada em seis capítulos. No presente capítulo expõem-se o enquadramento e justificação do tema, os principais objetivos e a metodologia de trabalho.

No Capítulo 2 elabora-se uma breve descrição da evolução histórica dos caminhos de ferro em Portugal e, neste âmbito, dá-se relevância às pontes metálicas - obras de arte essenciais e de particular complexidade que permitiram a sua implantação.

O Capítulo 3 descreve a vida e obra do Gustave Eiffel, bem como a sua passagem por Barcelos. É apresentada uma lista detalhada de todas as pontes da Casa Eiffel e a sua localização em Portugal, sendo enumeradas as fontes bibliográficas que estiveram na base deste estudo. São descritas as quatro pontes existentes atualmente.

No Capítulo 4 são apresentados em pormenor os materiais utilizados e as suas características mecânicas. São também expostas as diferentes soluções estruturais das pontes metálicas construídas pela Casa Eiffel em Portugal. No mesmo capítulo faz-se a descrição do modo como as pontes eram dimensionadas, os elementos estruturais que eram alvo de verificação e os esforços para o qual eram dimensionados. Por último, expõe-se as pontes metálicas da Casa Eiffel já substituídas e as que ainda perduram. Estas últimas são motivo de alguma pormenorização do ponto de vista do seu atual estado físico, de conservação e das suas características estruturais, chamando a atenção para a necessidade imperiosa de mantê-las e promovê-las como património de incalculável valor.

No Capítulo 5 é apresentada uma síntese quantitativa relativa às 27 pontes com comprimento superior a 20 m, realizadas pela Casa Eiffel em Portugal.

É ainda feito um reconhecimento dos padrões estruturais das pontes da Casa Eiffel, através de três parâmetros característicos, nomeadamente a razão entre os tramos extremos e os intermédios, a esbelteza e a razão entre os momentos atuantes máximos dos tramos extremos e dos tramos intermédios onde se expõe algumas razões de suporte da tomada de decisão de recorrer a um determinado tipo de estrutura conforme o desafio da obra de arte a construir. Foram também identificadas sistematizações na escolha das soluções estruturais.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas com a presente dissertação, apontando caminhos futuros para a divulgação do legado da Casa Eiffel em Portugal e a necessidade de preservar as pontes metálicas existentes.



## **Enquadramento das Pontes Metálicas**

### **2.1. Enquadramento histórico dos caminhos de ferro em Portugal**

A primeira etapa da implementação do transporte ferroviário em Portugal decorreu entre anos de 1844 e 1860.

Nos anos 50 do século XIX, sob o governo Regenerador, e com o impulso de Fontes Pereira de Melo no recém-criado Ministério das Obras Publicas, foi estipulado o enquadramento legal que produziu os primeiros contratos de construção de caminhos de ferro [5].

Assim, no dia 13 de maio de 1853 foi assinado o contrato entre o Governo Português e a “Companhia Central Peninsular dos Caminhos de Ferro” para a construção da primeira linha férrea de Lisboa a Espanha. O primeiro troço desta linha ligava Lisboa ao Carregado. A cerimónia do lançamento da primeira pedra da sua construção foi realizada no dia 28 de maio de 1853, com a participação da Rainha Dona Maria II (Figura 2.1). A sua construção durou três anos, sendo a sua inauguração apenas em 1856.

Este troço tinha a extensão de 36,454 km e, nessa altura, a viagem durava 40 minutos. Embora os caminhos de ferro tenham começado por usar a bitola europeia 1,435 m, esta viria a ser alterada para a bitola ibérica com uma distância entre carris de 1,668 m, com início em 1861 com a alteração da Linha do Leste.

O ambiente que se vivia na época era entusiasmante, pois viviam-se momentos em que eram introduzidas as mais variadas evoluções tecnológicas que nos dias de hoje parecem banais. Por exemplo, no mesmo ano em que se inaugurou a linha ferroviária entre Lisboa e o Carregado, foi também inaugurada a rede oficial de telégrafo elétrico.

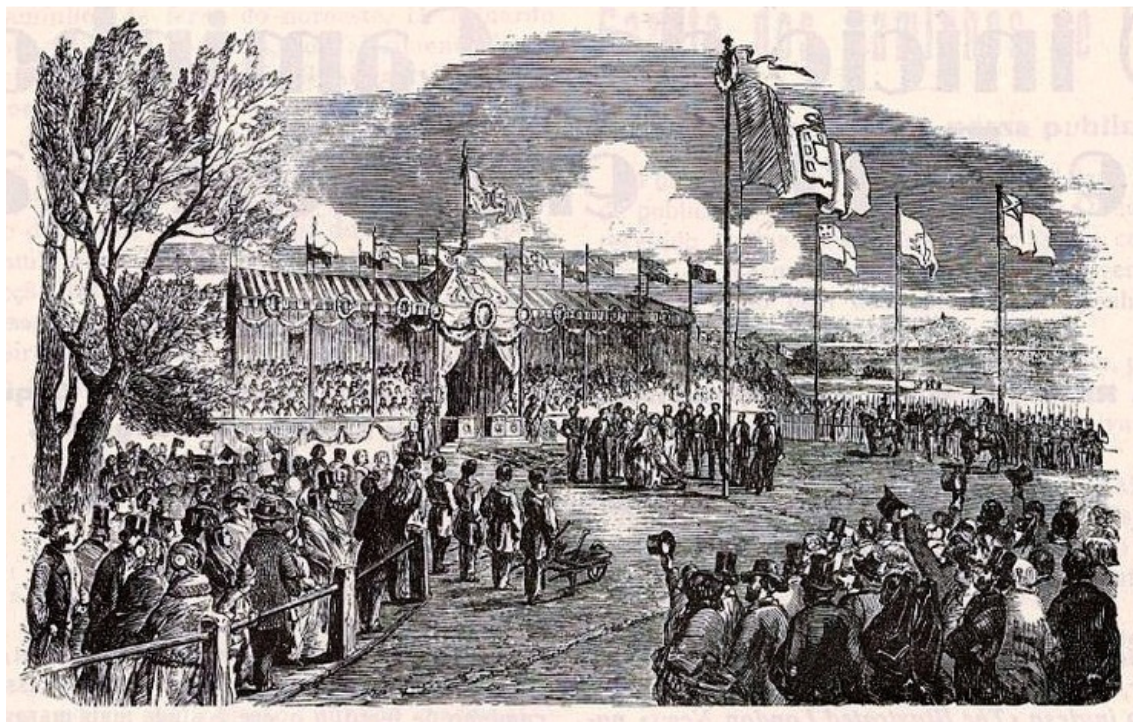


Figura 2.1 - Cerimónia do lançamento da primeira pedra da construção da primeira linha de comboio em Portugal [6]

No entanto, o conceito dos caminhos de ferro e do comboio contava com numerosos e ilustres opositores no nosso País. No dia 8 de fevereiro de 1856, Alexandre Herculano publicou um artigo em que, embora reconhecendo que “*nenhum descobrimento contribuiu tanto para o aumento da civilização como o vapor e os caminhos de ferro*”, também aponta que estes não contribuem para o “*melhoramento social e moral dos povos*” e insinua que podem afetar “*a índole política ou social*” dos países que os introduzem. Também Almeida Garrett, nas “Viagens na minha terra”, defende claramente as estradas contra os caminhos de ferro [7].

A grande explosão ferroviária portuguesa começa em 1860, com a entrada em ação do Marquês de Salamanca e da Companhia Real dos Caminhos de Ferro, concessionária dos caminhos de ferro do Norte e Leste, de capital francês, enquanto a sul se constituí uma empresa

de capital britânico, que se ocuparia do sistema do Sul e Sueste. Até 1865, a Linha do Leste alcançou Badajoz, a Linha Norte chegaria a Vila Nova de Gaia, enquanto a Linha Sul atingiu Évora e Beja. Ficavam assim delineados os eixos centrais, a partir dos quais seria vertebrada toda a restante rede ferroviária.

Nesta fase em que os caminhos de ferro tiveram um grande desenvolvimento, a construção era de iniciativa privada e contava com subsídios da parte do Estado. No entanto, a exploração não teve o retorno previsto, pois foi baseado em previsões de tráfego que não se vieram a confirmar. Com este panorama, as companhias ferroviárias nacionais perdem o interesse nos caminhos de ferro, ficando os concursos públicos sem qualquer proposta de iniciativa privada.

Como consequência disso, entre 1865 e 1877, o ritmo de construção seria mais lento e o capital privado estrangeiro afastar-se-ia dos investimentos ferroviários no país. Devido a este afastamento, o Estado assumiu a iniciativa ao resgatar as Linhas do Sul e Sueste, propondo-se prolongá-las. Além disso, assumiu para si a promoção da construção das Linhas do Minho, iniciada em 1872, e da linha do Douro, iniciada em 1873 [8]. Houve, contudo, alguma participação de capital privado português na ferrovia neste período, com a construção de duas pequenas linhas de via estreita nas proximidades do Porto, que eram rentáveis por beneficiar do tráfego suburbano gerado pela cidade.

A partir de 1877, o crescimento do tráfego animaria de novo a intervenção de capital estrangeiro, principalmente francês, que construiu a linha da Beira Alta, mas agora também, com uma importante fatia de investimento alemão. Em 1877, a Companhia Real dos Caminhos de Ferro inaugurou a Ponte Maria Pia e, assim, a linha do Norte alcançou finalmente a cidade do Porto. De seguida, foram postos em exploração o ramal de Cáceres, a linha da Beira Baixa, a linha do Oeste, o ramal de Sintra, a linha de Cascais, a linha de Cintura e é inaugurada a estação central do Rossio, em Lisboa.

Entre 1890 e 1891, uma grave crise pôs fim a este período expansionista. Nesta altura, os caminhos de ferro começam a ser encarados como um serviço público e, com esta perspetiva, o retorno financeiro imediato deixa de ser o principal critério, passando a ser prioridade os caminhos de ferro servirem a população e o País [7].

Na década de 90 do século XIX, a configuração da rede ferroviária portuguesa adquiriu assim a sua configuração praticamente definitiva, sendo as novas construções de caminhos de ferro muito limitadas até aos dias de hoje. Na Figura 2.2 pode observar-se a vermelho a rede de caminhos de ferro implantada no ano de 1895.



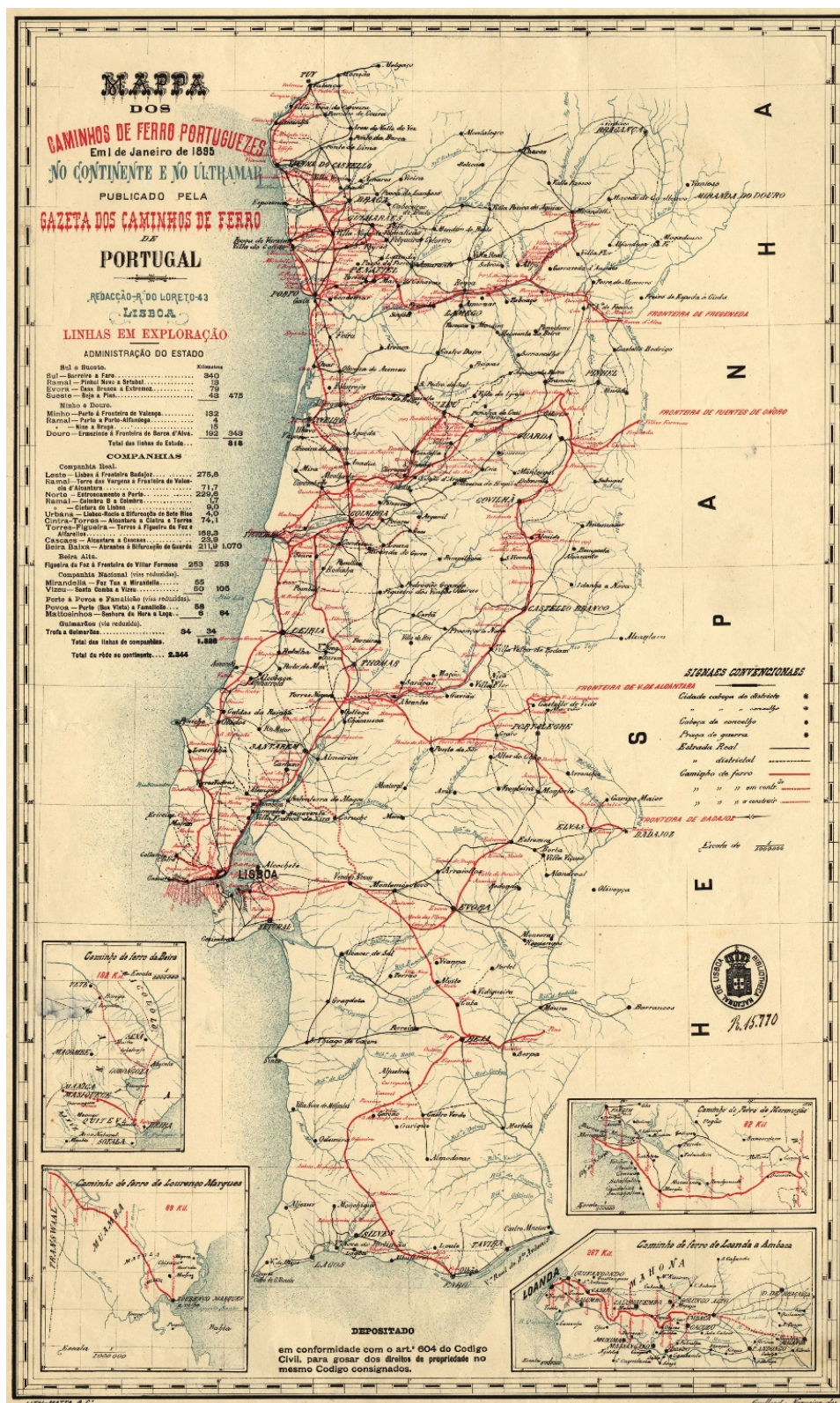


Figura 2.2 - Mapa da rede de caminhos de ferro portugueses no ano de 1895 [9]



## 2.2. As pontes ferroviárias em Portugal

A ponte é “*uma construção em aço, pedra, madeira, etc., provisória ou permanente, destinada a estabelecer ligação ao mesmo nível entre dois pontos separados por um curso de água ou por uma depressão de terreno*” [10], pese embora a afirmação, a separação entre ponte e viaduto é por vezes de difícil critério, neste trabalho de um modo geral, optou-se por designar por ponte todo o tipo de estrutura metálica.

O início da história das pontes metálicas em Portugal remonta à data da construção dos caminhos de ferro e construtores como a Casa Eiffel, Fives-Lille, Braine-le-Comte, Empresa Industrial Portuguesa, Cardoso D’Argente, Fried-Krupp, Caminhos de Ferro Portugueses, Mague, Sorefame, entre outros, dedicaram-se à sua conceção e construção.

Em Portugal, cerca de 40% das pontes ferroviárias são metálicas, correspondendo a um comprimento total de, aproximadamente, 23,4 km. Este valor é bastante superior às não metálicas que correspondem apenas a 15,0 km. A maioria das pontes metálicas têm mais de um século, correspondendo à fase de grande expansão já descrita anteriormente, e a soma do comprimento das mesmas corresponde a, aproximadamente, 9,2 km [11].

Assim, o património de pontes metálicas em Portugal é assinalável. Para isso contribuiu a neutralidade portuguesa na 2ª Guerra Mundial, pois permitiu que as mesmas não fossem destruídas por bombardeamentos. Além disso, as autoridades optaram por uma política de reparação e reforço das pontes, o que permitiu a conservação destas, mantendo-se mesmo algumas até aos dias de hoje.

Ao longo da história, a responsabilidade da manutenção e conservação das pontes ferroviárias em Portugal, sofreu várias alterações na sua orgânica. A entidade que atualmente detém a responsabilidade pela conservação das pontes ferroviárias em Portugal é a IP, que integrou em 2016 a REFER, tornando-se assim como a legítima herdeira de uma história que começou no século XIX.

Na rede ferroviária nacional existem atualmente 351 pontes metálicas, sendo a Ponte de Viana do Castelo, atual Ponte Eiffel na linha do Minho, a ponte metálica mais antiga ainda em funcionamento. Esta é uma obra da Casa Eiffel, feita em ferro pudelado, e foi inaugurada 1878. Posteriormente, recebeu algumas intervenções, em que foi feita a adaptação às condições atuais do tráfego ferroviário, existindo a preocupação de alterar o mínimo possível o desenho original. Por outro lado, a Ponte de São Pedro, situada na linha da Beira Baixa e construída em 1889 pela empresa Braine-le-Comte, é a ponte metálica mais alta.

Atualmente, a rede ferroviária nacional tem ainda ao serviço 541 pontes em alvenaria, entre as quais a Ponte do Tâmega, na Linha do Douro, com 264 metros de comprimento, e que substituiu em 1931 uma ponte metálica construída pela Casa Eiffel.

Recentemente, o ferro e a alvenaria têm vindo a dar lugar ao betão armado e pré-esforçado. Apesar de existirem pontes ferroviárias em betão desde os anos 20 do século XX, foram construídas nas últimas três décadas um número significativo de pontes em betão armado e pré-esforçado, sendo exemplo os investimentos feitos na renovação da Linha do Norte. Existem 902 pontes em betão armado e pré-esforçado na rede ferroviária nacional, como por exemplo o viaduto de Corroios.

Nos dias de hoje, na construção de pontes, em especial para as de maior vão, privilegia-se a construção de pontes mistas aço-betão. Exemplo disso é a ponte sobre o rio Sado, executada aquando da construção da Variante de Alcácer, sendo esta uma ponte de arco superior do tipo *Bowstring* [12]. Na rede ferroviária nacional existem 54 pontes mistas aço-betão.

Há ainda a acrescentar a existência de 218 pontes desativadas, onde se inclui a Ponte Maria Pia, que possui o maior arco metálico existente em Portugal e foi construída em 1877 pela Casa Eiffel.

## **2.3. Pontes metálicas**

### **2.3.1. Evolução histórica**

Como já referido, a construção de pontes metálicas teve início no final do séc. XVIII e, desde então, tem evoluído através da otimização do material e das soluções estruturais [11]. A história das pontes metálicas está intimamente ligada à evolução na produção dos materiais utilizados. No início do séc. XVIII, Abraham Darby I desenvolve um método de produção de ferro de alta qualidade, o qual é atualmente denominado de ferro fundido. Passadas três gerações, no final do mesmo século, Abraham Darby III constrói a primeira ponte metálica em Inglaterra, cuja construção começa no ano de 1777 e é concluída no ano de 1779 [13]. Esta obra de arte, que permite o atravessamento do rio Severn, continua a impressionar as várias gerações que a visitam, através da combinação de *design* robusto e do rendilhado delicado que a caracterizam (Figura 2.3).

Desde essa altura, e em virtude do significativo desenvolvimento na produção do ferro, a construção de pontes metálicas observou uma evolução muito importante [14]. Assim, por volta de 1784, surge o ferro pudelado, também designado por ferro forjado, o qual começa a ser utilizado em pontes por volta de 1800 [11].

Durante o século XIX, o ferro fundido e pudelado foram os materiais mais utilizados na construção de pontes metálicas, pois apresentavam uma boa resistência à corrosão e boas propriedades mecânicas, que de certo modo, se complementavam nas suas aplicações, i.e., o ferro fundido tinha uma boa resistência à corrosão e compressão, enquanto que o ferro pudelado possuía um bom comportamento à tração.



Figura 2.3 - Ponte Iron Bridge [13]

A primeira ponte metálica em Portugal foi inaugurada em 1854 em Xabregas, Lisboa, também mais conhecido pelo Viaduto de Xabregas. Esta obra destinava-se ao tráfego ferroviário e a sua superestrutura era em ferro fundido (Figura 2.4) [11]. A ponte foi substituída em 1954.

Com a invenção e desenvolvimento do processo siderúrgico por Bessemer, por volta de 1855, e, mais tarde, dos processos de Thomas-Gilchrist e Siemens-Martin, foi possível produzir materiais metálicos mais limpos e com melhores características, como o aço macio (ver Tabela 2.1) [11]. O aço começou a ser utilizado com maior frequência na construção de pontes no início do século XX.



Figura 2.4 - Viaduto de Xabregas [15]

Tabela 2.1 - Evolução histórica dos elementos metálicos [16]

Material	Características mecânicas	Propriedades
Ferro Puro	$\sigma_{\text{elast}} = 180 \text{ MPa}$ $\sigma_r = 300 \text{ MPa}$ $\epsilon_{\text{rotura}} = 30\%$ (alongamento)	Boa resistência à corrosão atmosférica Muito dútil Não soldável
Ferro Fundido	$40 < \sigma_{\text{elast}} < 100 \text{ MPa}$ Tensão de cedência $100 < \sigma_r < 150 \text{ MPa}$ $1\% < \epsilon_{\text{rotura}} < 8\%$	Utilizado até ao séc. XIX devido à facilidade de moldagem do material. Boa resistência à corrosão. Não soldável. Rico em carbono, enxofre e fósforo, tornando-o um material bastante frágil. Nos dias de hoje, este material é utilizado em mecânica e ferramentas, todavia ainda continua a ser utilizado em elementos especiais como aparelhos de apoio, etc.
Ferro Pudelado	$200 < \sigma_{\text{elast}} < 300 \text{ MPa}$ $300 < \sigma_r < 400 \text{ MPa}$ $5\% < \epsilon_{\text{rotura}} < 25\%$	Forma primitiva do aço foi o material mais utilizado no séc. XIX na construção metálica, contudo desapareceu no início do séc. XX. Possuía boas características mecânicas, mas devido ao seu modo de fabricação que provocava pequenas inclusões, estas potenciavam a formação de corrosão paralelamente ao plano de laminagem que provocava o “folhear” do material. Por vezes era rico em carbono, enxofre e fósforo, que o tornava frágil e dificilmente soldável.
Aço Macios	$240 < \sigma_{\text{elast}} < 280 \text{ MPa}$ $420 < \sigma_r < 450 \text{ MPa}$ $\epsilon_{\text{rotura}} > 23\%$	Apareceu em meados do séc. XIX, distingue-se do ferro pudelado pela sua uniformidade de características e pela inexistência de impurezas, em especial o fósforo. Pouca tendência para a corrosão. Soldável. Dútil.

### 2.3.2. Soluções estruturais

Existem várias soluções estruturais para conceção de pontes metálicas, sendo as mesmas frequentes [14]:

- *Pontes em Viga*: os esforços transversais (momento atuante e esforço transversal) entre os apoios verticais são os principais esforços observados. Podem ser divididas em: pontes com tramos simplesmente apoiados, tramos contínuos e vigas cantilever;
- *Pontes em Pórtico*: neste tipo de estruturas, as vigas longitudinais são rigidamente ligadas aos elementos, verticais ou inclinados, de apoio, havendo transmissão de momentos nos nós. Além dos esforços transversais, pode desenvolver-se algum esforço axial;
- *Pontes em Arco*: as cargas são transmitidas às fundações por compressão axial, através do arco - o elemento estrutural principal. A reação horizontal nas extremidades é garantida pela fundação ou por tirantes ao longo do comprimento total do vão. No último caso, a estrutura é vulgarmente chamada de *Bowstring*;
- *Pontes Atirantadas*: as vigas principais são suportadas por um conjunto de tirantes dispostos num plano vertical, ou próximo, que são pendurados de uma ou mais torres;
- *Pontes Suspensas*: o tabuleiro da ponte é suspenso por pendurais tensionados em cabos principais ao longo dos bordos da ponte e ancorados ao terreno nas extremidades da mesma. Estes cabos passam geralmente por torres ao longo da ponte.

Do conjunto de soluções atrás descritas, é de salientar que os três primeiros tipos de pontes (vigas, pórtico e arco) e os tabuleiros dos dois últimos tipos (atirantadas e suspensas) podem ser constituídos por vigas de alma cheia ou vigas em treliça.

Ao longo dos tempos, na execução de pontes metálicas, foram usados vários tipos de vigas em treliça. Na Figura 2.5 mostra alguns exemplos das configurações mais tradicionais [17].

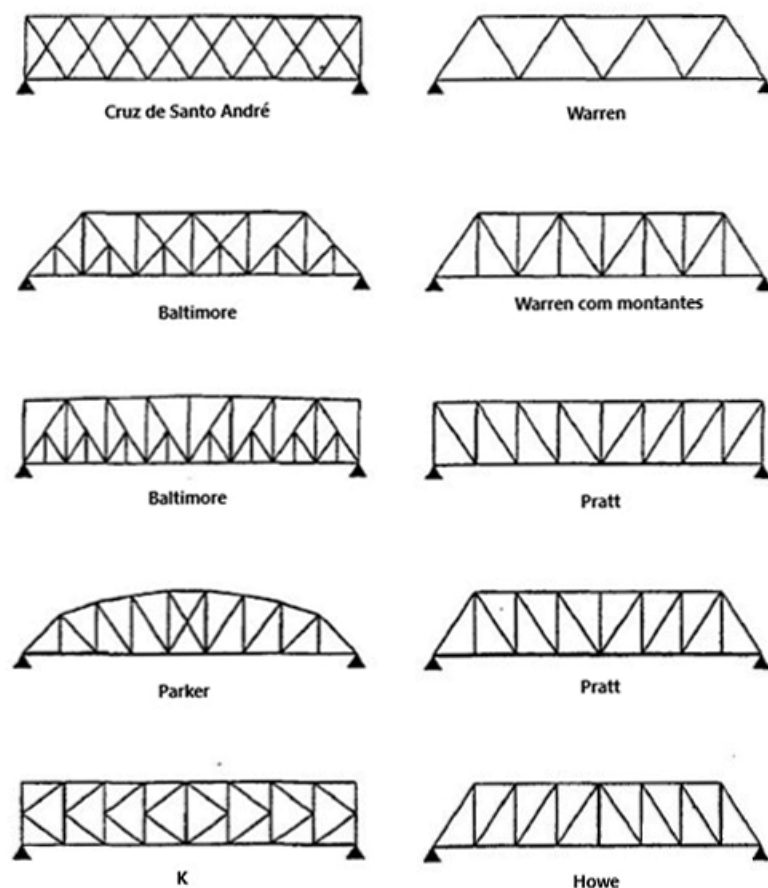


Figura 2.5 - Vigas tipo em treliça para pontes metálicas, adaptado de [17]

A Tabela 2.2 faz o agrupamento das várias pontes metálicas em Portugal pelo tipo de treliça, onde se pode observar que a treliça Cruz de Santo André é a mais utilizada, ficando a treliça de rótula múltipla em terceiro lugar (como se verá mais tarde, estes tipos de treliça estão associados à época da presença da Casa Eiffel em terras lusas [14]).

Tabela 2.2 - Tipos de treliça existentes nas Pontes metálicas em Portugal

Tipo de Treliça	N.º de Pontes
Cruz de Santo André	101
Pratt ou N	44
Rótula múltipla	43
Warren	27

### 2.3.3. Secções tipo

Para melhor compreender os sistemas estruturais observados em estruturas metálicas, que foram construídas na segunda metade do século XIX e no início de século XX, é necessário compreender que as técnicas de laminagem utilizadas estavam ainda numa fase embrionária.

A laminagem naquela época só permitia a obtenção de chapas e a sua espessura, de um modo geral, não ultrapassava os 9 mm. Além das chapas, era possível a criação de cantoneiras, as quais eram obtidas através da dobragem das chapas.

As chapas após a laminagem tinham comprimentos entre 6 m e 10 m, dependendo do elemento estrutural em que eram usadas; para a sua união usava-se cobre-juntas. Os banzos das vigas eram compostos por várias chapas sobrepostas, para assegurar a resistência em zonas de maiores esforços, tais como a meio vão e apoios. Graças a essa técnica era dispensada a utilização de cobre-juntas.

Devido às restrições impostas pela limitada técnica de laminagem, e ainda à impossibilidade da utilização do processo de soldadura, as secções dos elementos estruturais eram executadas através da rebiteagem de chapas e cantoneiras.

Na Figura 2.6 são apresentados vários exemplos obtidos através da rebiteagem de chapas e cantoneiras, sendo assim possível obter perfis com as várias configurações necessárias para os diversos elementos constituintes de uma ponte metálica [14].

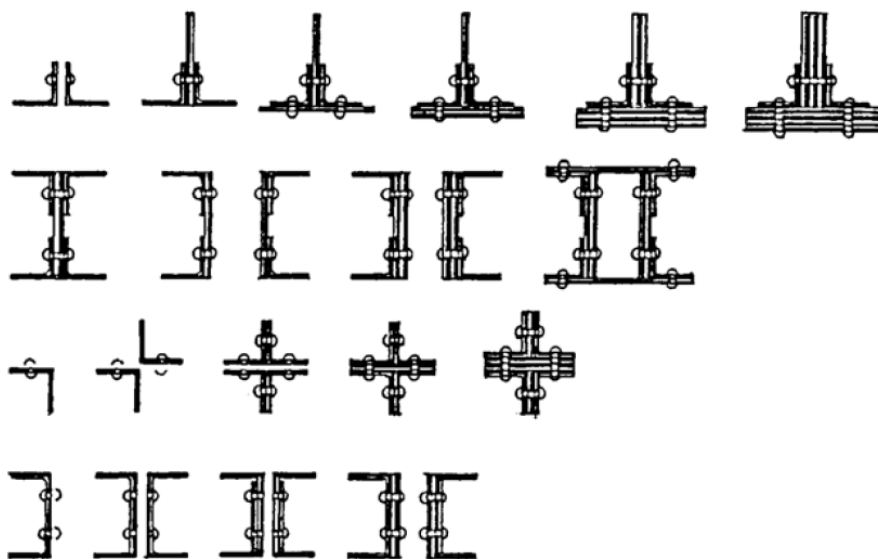


Figura 2.6 - Secções tipo com recurso a rebiteagem [18]

### **2.3.4. Constituição das pontes**

De uma forma geral, as pontes são constituídas por uma superestrutura (a parte que vence o vão e que inclui o tabuleiro) e por uma infraestrutura (o conjunto de pilares, encontros, aparelhos de apoio e fundações).

#### *2.3.4.1. Tabuleiro*

O tabuleiro tem a importante função de permitir a circulação de tráfego. Nas pontes metálicas, o tabuleiro pode apoiar-se na parte superior da viga, na parte inferior da mesma ou ainda a meio da treliça. Podem coexistir dois tabuleiros para receber a circulação ferroviária e rodoviária. Nas pontes treliçadas mais antigas, em que não existia laje de pavimento, o tabuleiro era unicamente constituído pelos carris e travessas.

#### *2.3.4.2. Superestrutura*

É o conjunto que integra o tabuleiro e todos os restantes elementos que vencem o vão. Portanto, é o conjunto que tem como função, suportar o tabuleiro e é constituído por um grupo de elementos (treliças, vigas, longarinas, carlingas, etc.) que detêm um papel fundamental no desempenho estrutural da ponte, porque é sobre ele que descarregam as ações que atuam sobre o tabuleiro. A rotura de qualquer um dos seus elementos estruturais torna-se crítica para a estabilidade global da ponte. A sua configuração e o seu estado de conservação afetam o grau de segurança estrutural da ponte, podendo em casos em que exista má conservação, ser posto em causa o seu desempenho.

Note-se que atualmente é corrente a designação de tabuleiro para a própria superestrutura e não apenas para a laje de tabuleiro propriamente dita.

#### *2.3.4.3. Aparelhos de apoio e juntas de dilatação*

Os aparelhos de apoio e as juntas de dilatação têm um papel essencial no desempenho estrutural da ponte, pois são os elementos que transmitem os esforços da superestrutura para a infraestrutura e permitem a absorção de deslocamentos devidos às ações, como por exemplo a variação de temperatura, sismos, frenagem, etc.

Um funcionamento deficiente pode dar origem a esforços suplementares, podendo afetar os elementos da ponte, cujas consequências não foram previstas no dimensionamento. Os apoios podem ter várias configurações:



- Apoios fixos;
- Apoios rotulados;
- Apoios deslizantes ou de expansão;
- Apoios rotulados, ligados e de rolamentos ligados.

Normalmente, só em vãos maiores que 15 m é que se impõe a aplicação de apoios, para permitir a rotação devido à flexão da viga treliçada. Em vãos inferiores são usados simplesmente apoios com deslizamento simples, que é feito entre chapas com superfície lisa. A maioria dos apoios atualmente são em aço, neoprene, teflon, bronze ou numa combinação entre estes materiais.

#### *2.3.4.4. Fundações*

Devido à idade das pontes metálicas em treliça, a maioria dos pilares, encontros e fundações são em alvenaria e argamassa, e betão não armado [19]. Atualmente, a sua construção é na generalidade assegurada por elementos de betão armado.

## **2.4. Considerações finais**

Neste capítulo é apresentado um enquadramento histórico social e político, no qual surgiram os primeiros caminhos de ferro em Portugal. Apresentam-se as dificuldades inerentes a sua implantação, desde a oposição de personalidades da época, à questão da bitola, ao financiamento público e privado e à sua rentabilidade económica. Observa-se que a evolução dos caminhos de ferro está diretamente ligada à situação económica em cada altura e ao surgimento das pontes metálicas. Apesar das dificuldades, em 1895 estava implantada uma rede ferroviária em Portugal, digna de qualquer outro país europeu.

É realizado um enquadramento das pontes ferroviárias em Portugal e a sua evolução histórica, em termos de material constituinte e solução estrutural, pormenorizando-se as pontes metálicas como de maior interesse para esta dissertação. No caso destas, é apresentada a primeira ponte metálica em ferro fundido, conhecida como Viaduto de Xabregas. Adicionalmente, é descrita a evolução histórica do metal no século XIX, (ferro puro, ferro fundido, ferro pudelado e aço macio), sendo apresentado o processo de fabrico do ferro pudelado utilizado à época e as principais soluções estruturais de pontes metálicas.

No final, para uma melhor compreensão e definição de terminologia das pontes, são descritos, brevemente, cada um dos elementos constituintes das pontes metálicas e a sua função.

Note-se que desde a primeira ponte metálica, as técnicas de construção de pontes floresceram em muitas formas e das mais variadas conceções. Muitos dos maiores rios da atualidade são atravessados por pontes suspensas. As pontes metálicas ainda continuam a ser aos dias de hoje, uma opção válida na construção de novas travessias, temos como exemplo disso, a Ponte Akashi Kaikyo (Figura 2.7) localizada no Japão, inaugurada no ano de 1998, e que tem uma extensão total de 3911 m.



Figura 2.7 - Ponte Akashi Kaikyo [20]

# Vida e Pontes Metálicas de Gustave Eiffel em Portugal

## 3.1. Considerações iniciais

Este capítulo faz uma breve descrição da vida do Gustave Eiffel, do contexto histórico e social na altura da sua formação, referindo as suas origens e o início da sua vida profissional. É dada atenção ao período de permanência do Gustave Eiffel, em Barcelinhos, Portugal, com a sua família. Em paralelo, é apresentada a sua evolução profissional, sendo referidos os seus principais mentores, o seu percurso profissional, que lhe permitiu agregar diversas valências, entre as quais se destaca o seu rigor científico e a sua capacidade de gestão e organização.

Do ponto de vista de engenharia, é dada particular atenção à obra do Gustave Eiffel em Portugal, sendo apresentada uma síntese das pontes metálicas com comprimentos superiores a 20 m, sendo feita uma descrição mais detalhada das pontes da Casa Eiffel existentes atualmente no país.

## 3.2. Vida e obra de Gustave Eiffel

Gustave Eiffel foi conhecido por “Le magicien du fer”, a qual será talvez a melhor caracterização deste ícone da França e do Mundo, tendo construído pontes metálicas, edifícios e monumentos, um pouco por todo o mundo [21]. O expoente máximo, pelo qual ainda é lembrado hoje, é a Torre Eiffel em Paris, símbolo máximo das estruturas metálicas. Além desta obra emblemática, tem outras que marcam definitivamente os sítios onde estão implantadas, como é o caso da Ponte Maria Pia no Porto e a estrutura da Estátua da Liberdade em Nova Iorque.

Gustave Eiffel nasceu em 15 de dezembro 1832 em Dijon [22] [23], França, situado na confluência dos rios Suzon e Ouche, sendo esta região conhecida, na altura do nascimento de Eiffel, como uma das melhores regiões de produção de vinho e também considerada como o centro intelectual da França. Com o aparecimento dos caminhos de ferro no século XIX, Dijon tornou-se um importante centro de transporte de minério e indústria pesada, sendo atualmente essa região conhecida pela produção de vinagre, chocolate e mostarda.

Neste contexto histórico e geográfico, a mãe de Gustave Eiffel, que estava a dar continuidade ao negócio da família na área do carvão vegetal, com a introdução da tecnologia dos Altos-fornos, resolveu apostar no carvão mineral, que tinha na altura uma grande procura [24].

Em 1844, Gustave Eiffel, com 12 anos, visita pela primeira vez Paris com a sua mãe. Dois anos mais tarde voltou a Paris, desta vez acompanhado pelo pai, sendo a razão desta vinda a sua matrícula no Collège Sainte-Barbe. Durante este período, o seu aproveitamento foi mediano, ficando a ideia que ele teria mais vocação prática do que propriamente no campo académico. No final do seu percurso escolar, no Collège Sainte-Barbe, devido a dúvidas dos seus professores na sua capacidade académica, Gustave Eiffel foi submetido a uma entrevista em resultado da qual, em vez de seguir o ambicionado acesso à Ecole Polytechnique, foi-lhe dado o certificado que lhe garantia o acesso à Ecole Centrale des Arts et Manufactures, esta era uma instituição que nasceu da iniciativa privada e tinha como principal objetivo a formação de engenheiros generalistas necessários para o setor industrial então emergente em França, sendo esta considerada mais vocacional do que a Ecole Polytechnique que formava os seus estudantes para os quadros de estado [25]. Após o segundo ano de frequência, na altura de escolher uma área para se especializar, dentro das áreas de metalurgia, mecânica, química e civil, Gustave Eiffel escolheu a área de química [24].

Esta decisão, ao que tudo indica, foi uma decisão pragmática, pois o seu tio, um homem sem filhos, o tinha nomeado sucessor da sua indústria de produção de vinagre. Apesar disto, não foi por este caminho que o seu futuro se viria a desenrolar, pois Gustave Eiffel e seu tio viriam a desentender-se por razões familiares e também, com o falecimento do seu tio durante os seus estudos, a fábrica abriu falência devido a má gestão [24].

Apesar disso, e felizmente para Gustave Eiffel, a Ecole Centrale apostava na preparação de estudantes para um leque alargado de educação técnica, sendo assim a sua formação bastante aprofundada em vários temas [24].

Após a sua graduação, considerando que precisava de enveredar por uma nova carreira, Gustave Eiffel começa a trabalhar como estagiário na fundição de alto-forno Châtillon-sur-Seine, junto do seu cunhado [23] [24]. Tentou com esta sua experiência aprender o máximo em

termos técnicos, administrativos e financeiros, tendo sempre em vista que este estágio seria apenas uma fase de transição. Quando Gustave Eiffel procurava encontrar o seu caminho profissional, surgiu-lhe uma oportunidade que se viria a revelar um grande golpe de sorte, nomeadamente a sua ida para a indústria mais dinâmica na altura, tanto em França como no resto da Europa a indústria dos Caminhos de Ferro.

Nesse seu novo trabalho, conhece Charles Nepveu, um engenheiro muito respeitado na área de projeto e construção de motores a vapor para as locomotivas e de material circulante. Assim, Eiffel teve a oportunidade de estudar alguns temas específicos, do qual se destaca a conceção de equipamentos para execução de fundações em leitos de rios, que lhe viria a ser muito útil posteriormente [23] [24].

Mais tarde, a empresa de Charles Nepveu entra em falência, mas porque este gostava tanto do seu protegido Eiffel, este encontrar-lhe um bom emprego na Compagnie des Chemins de Fer de l'Ouest onde vem a conhecer Eugène Flachet. Anos depois, Eiffel escreveu que devia muito a Flachet, pois este tinha sido o pioneiro, em França, na introdução do ferro fundido fixado com rebites, ao invés de parafusos e pinos usados até então [24].

Em França, a introdução de pontes metálicas, compostas por ferro pudelado e montadas através de rebites, foi mais tardia em relação a Inglaterra, onde teve a sua origem.

A primeira ponte metálica projetada por Eiffel e prontamente aceite para construção, tinha cerca de 22 m de vão, era em ferro fundido e foi construída para a Saint-Germain Railway [24]. Com o sucesso desta primeira obra, houve a esperança que novos projetos ocorressem, tal como viria a acontecer, vencendo o concurso para uma grande Ponte em Bordéus, com uma extensão de aproximadamente 500 m. Neste caso, o principal desafio para Eiffel foi o prazo de construção de dois anos, o qual foi uma prova de fogo que conseguiu superar com distinção, alcançando assim a admiração e o respeito de todos e também dos seus trabalhadores, que no final o presentearam com uma medalha. Esta medalha tinha numa das faces a ponte e na outra o aparelho de execução de fundações, introduzido pela primeira vez em França por ele. A ponte, apesar de já ter sofrido algumas intervenções, ainda existe nos dias de hoje (Figura 3.1).

A utilização na engenharia civil de estruturas de ferro e mais tarde de aço iniciou-se pela construção de pontes. Com isso, a substituição de materiais tradicionais, como a madeira e alvenaria, colocou novos desafios aos engenheiros, tanto ao nível de projeto, como ao nível da necessidade de novos métodos construtivos.

Um dos desígnios que acompanhou Eiffel durante toda a sua carreira foi que, ao contrário dos métodos de construção baseados na aproximação por tentativa e erro que imperavam naquela época, ele era muito disciplinado no processo de execução e exigente no planeamento, sendo assim considerado um gestor astuto e um excelente organizador.

A ponte projetada por Gustave Eiffel em Bordéus, em 1860, que tomou o nome de “La Passerelle” (Figura 3.1), representa a primeira ponte com um modelo de vigas em treliças de altura constante. Pela sua simples conceção, conduziu a enormes benefícios ao nível do processo construtivo e poupança de materiais [24] [2]. Nesta ponte, Eiffel introduziu uma técnica com um procedimento aperfeiçoado por si [24] [2], para a realização das fundações dos pilares, através de caixões de ar comprimido.

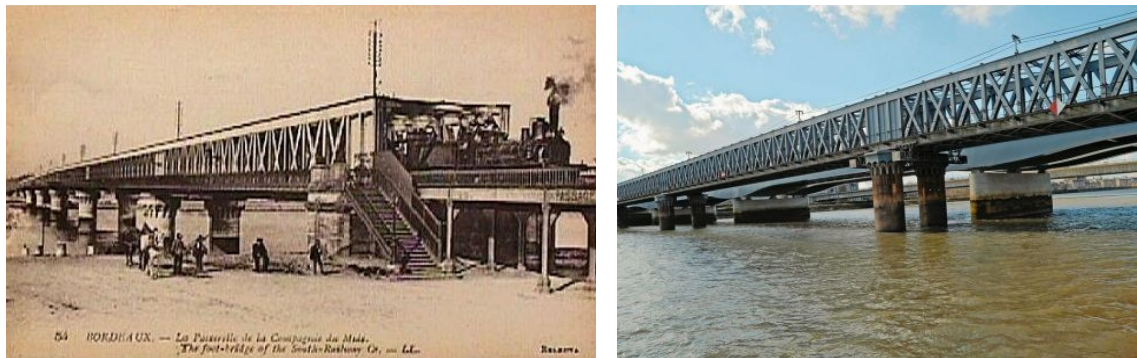


Figura 3.1 - Ponte La Passerelle na altura da construção (à esquerda) e atualmente (à direita) [26]

### 3.3. Estadia de Gustave Eiffel em Portugal

Com a reputação de Eiffel no exterior a ser bem estabelecida, em março de 1875, ele muda a sua residência para Portugal devido à construção da Ponte Maria Pia. Surpreendentemente, fez-se acompanhar por sua esposa, Marie Marguerite (Figura 3.2), que não se encontrava bem de saúde. Durante muito tempo, ela sofreu da doença “*maladie de poitrine*”, que não deixava qualquer esperança de cura nessa época. A sua esposa vem a falecer em França, a 8 de setembro de 1877, aos 32 anos, de uma de hemorragia interna. [23].



Figura 3.2 - Retrato de Marie Marguerite e Gustave Eiffel, com os seus filhos em Levallois-Perret [23]

Em Portugal, Gustave Eiffel estabeleceu residência em Barcelinhos, freguesia do concelho de Barcelos, onde desenvolveu os projetos das construções realizadas nesse período em Portugal [27]. Aqui teve oportunidade de interagir com a povoação do concelho - consta que apreciava a vida simples dos habitantes locais e “aos domingos não desdenhava acompanhá-los às boas adegas da região, na mais amistosa camaradagem” [28].

Note-se que Eiffel chega a Portugal numa altura em que existia uma Monarquia Constitucional com um regime liberal, o que permitiu a ocorrência de um período de acalmia política e de um grande desenvolvimento económico e tecnológico. Além disso, permitiu o surgimento de leis respeitadoras de direitos humanos, entre as quais, no ano de 1867, a abolição da pena de morte para crimes civis. Contudo, este período foi interrompido em 1890 pelo ultimato inglês, segundo o qual Portugal era obrigado a renunciar a parte do território em África [29].

A data de partida de Gustave Eiffel de Portugal não é clara na bibliografia. Segundo [28] Eiffel deixou Portugal em 1877, após a morte súbita de sua secretária Victorinne Roblot com 36 anos, que ficou sepultada junto da igreja paroquial de Barcelinhos [28]. Contudo, a consulta do livro de óbitos [30] da Paróquia de Barcelinhos de 1878 diz que Victorinne faleceu no dia 3 de abril de 1878 e foi o sexto óbito desse ano. Em seguida transcreve-se o registo:

*Aos três dias do mês de abril do ano de mil oitocentos e setenta e oito às oito horas da manhã em uma casa desnumerada do lugar da Igreja desta freguesia de Santo André de Barcelinhos, concelho de Barcelos, Diocese de Braga faleceu tendo recebido os sacramentos da Santa Madre Igreja um individuo do sexo feminino por nome Victorina\* Roblot de idade de trinta e seis anos viúva de Monsieur Le Blond, natural de Nanterre Departamento do Seine e Diocese de Paris, Império da França, residente nesta freguesia, filha de Victor Roblot e de Margarida Roblot, a qual não fez testamento, deixando uma filha e foi sepultada com um responso na igreja desta freguesia por não haver cemitério público. E para constar lavrei em duplicado este assento que assigno.*

Além disso, no livro [31] diz que Eiffel deixou Portugal em 1877 com desgosto pela morte da sua mulher Marie Margaritha.

Contudo, tudo indica que Gustave Eiffel nunca mais voltou a Portugal, mas continuou a desenvolver trabalhos à distância.

---

\* Identificado a partir dos registos históricos – Livro ÓBITOS N.º 4, 1877-01-05 / 1891-12-29, embora se possa assumir que há uma gralha do pároco durante a escrita.

### 3.4. As pontes metálicas da Casa Eiffel construídas em Portugal

As pontes construídas pela Casa Eiffel, consideradas nesta dissertação, são as que têm uma extensão superior a 20 m, sendo as de extensão igual ou menor considerados pontões, dos quais também foram encontrados alguns projetos, mas que se tornavam mais difíceis de referenciar nas publicações da época, pois não eram motivo de divulgação.

Saliente-se também que, do inventário da Casa Eiffel disponível em várias fontes, existem mais projetos de pontes do que as enumeradas na dissertação.

Assim, as 27 pontes projetadas e construídas pela Casa Eiffel em Portugal encontram-se espalhadas, quase na sua totalidade, a Norte do Tejo, ao longo de várias linhas ferroviárias, tal como resumido na Tabela 3.1.

A tabela resume as características principais das pontes estudadas neste trabalho, as suas localizações, nomeadamente a linha ferroviária, o curso de água, o concelho, as suas coordenadas *Global Positioning System* (GPS) e as principais fontes analisadas. Para uma melhor perceção geográfica, a Figura 3.3 apresenta a localização das pontes através da sua identificação de acordo com a tabela. Por simplificação, nesta dissertação, optou-se por designar por “ponte” todas as estruturas que atravessam um vale ou uma linha de água. Não obstante, realce-se que na realidade três das 27 obras designadas são, portanto, viadutos.

As principais fontes que levaram à atribuição da autoria à Casa Eiffel, das 27 pontes metálicas, foram os projetos e contratos originais existentes no Arquivo da IP, as publicações da época nas revistas “O Occidente” e “Gazeta dos Caminhos de Ferro”, disponíveis na Hemeroteca Digital, e a revista “Boletim da C.P.” disponível na página da CP, E.P.E., além de outras publicações dispersas.

Em relação ao nome da Ponte Maria Pia, dado em homenagem à rainha consorte do rei D. Luís I, surgiram dúvidas na revisão dos documentos históricos, aparecendo em várias fontes referenciada como “Ponte Maria Pia” e em outras como “Ponte D. Maria Pia”. Neste trabalho optou-se pela primeira designação, de acordo com a “acta da sessão do Conselho de Administração da Companhia Real dos Caminhos de Ferro Portugueses” em que é determinada oficialmente a designação da “Ponte Maria Pia” [32].



Tabela 3.1 - Identificação, localização e principais referências bibliográficas das pontes metálicas da Casa Eiffel em Portugal

<b>Linha</b>	<b>Id</b>	<b>Nome</b>	<b>Curso de água</b>	<b>Concelho</b>	<b>Estado atual</b>	<b>Coordenadas GPS</b>	<b>Referências bibliográficas</b>
Linha do Minho	1	Ponte de Barcelos	Rio Cávado	Barcelos	Substituída	41°31'48.3"N 8°36'21.8"W	[33] [34]
	2	Ponte de Viana do Castelo	Rio Lima	Viana do Castelo	Em serviço	41°41'32.9"N 8°49'04.5"W	[35] [36]
	3	Ponte do Neiva	Rio Neiva	Barcelos - Viana do Castelo	Substituída	41°38'24.4"N 8°40'58.5"W	[33] [37]
	4	Ponte do Âncora	Rio Âncora	Caminha	Substituída	41°48'22.3"N 8°51'28.5"W	[35] [38]
Linha do Norte	5	Ponte Maria Pia	Rio Douro	Porto-Vila Nova de Gaia	Desativada em 1991	41°08'23.2"N 8°35'49.6"W	[39] [40]
	6	Ponte de Sacavém	Rio Trancão	Loures	Substituída	38°47'47.5"N 9°05'57.7"W	[37]
	7	Ponte da Asseca	Ribeira da Asseca	Santarém	Substituída	39°12'06.1"N 8°42'54.4"W	[37] [41]
	8	Ponte Monte Trigo	Desconhecido	Santarém	Substituída	39°15'50.5"N 8°39'49.9"W	[37]
	9	Ponte do Alviela	Rio Alviela	Santarém	Em serviço	39°20'32.5"N 8°36'08.0"W	[41]
	10	Ponte do Almonda	Rio Almonda	Torres Novas	Substituída	39°25'05.1"N 8°31'10.6"W	[41]
Linha do Douro	11	Viaduto Vila Meã	-	Amarante	Substituída	41°15'11.2"N 8°11'23.8"W	[42]
	12	Ponte do Tâmega	Rio Tâmega	Marco de Canaveses	Substituída	41°12'03.4"N 8°08'50.4"W	[43] [44]
Linha da Beira Alta	13	Ponte das Várzeas	Ribeira das Várzeas	Mealhada	Substituída	40°23'26.4"N 8°22'57.8"W	[45] [46]
	14	Viaduto do Milijoso	-	Mortágua	Substituída	40°23'40.0"N 8°20'44.3"W	[47] [45]

<b>Linha</b>	<b>Id</b>	<b>Nome</b>	<b>Curso de água</b>	<b>Concelho</b>	<b>Estado atual</b>	<b>Coordenadas GPS</b>	<b>Referências bibliográficas</b>
Linha da Beira Alta	15	Viaduto do Trezói	-	Mortágua	Substituída	40°23'41.3"N 8°20'18.8"W	[45] [47]
	16	Ponte da Breda	Barragem da Aguieira	Mortágua	Substituída	40°23'45.9"N 8°10'35.9"W	[37] [48]
	17	Ponte do Criz	Rio Criz	Mortágua – Santa Comba Dão	Substituída	40°23'21.8"N 8°09'57.2"W	[37] [48]
	18	Ponte do Dão	Rio Dão	Santa Comba Dão	Substituída	40°22'59.7"N 8°08'27.7"W	[48] [37]
	19	Ponte de Olas	Ribeira das Olas	Celorico da Beira	Substituída	40°39'27.9"N 7°23'17.8"W	[37] [49]
	20	Ponte Noémi	Rio Noémi	Sabugal	Substituída	40°30'22.7"N 7°03'55.5"W	[37] [49]
	21	Ponte do Côa	Rio Côa	Almeida	Substituída	40°33'48.4"N 6°55'51.2"W	[49] [50]
Linha da Beira Baixa	22	Ponte da Praia	Rio Tejo	Vila Nova da Barquinha – Constância	Em serviço	39°28'06.9"N 8°20'21.3"W	[51] [52]
Ramal de Cáceres	23	Ponte de Niza	Ribeira de Niza	Castelo de Vide	Substituída	39°24'08.9"N 7°31'07.5"W	[43] [53]
	24	Ponte de Castelo de Vide	Ribeira de Vide	Castelo de Vide	Substituída	39°26'29.5"N 7°26'07.7"W	[37] [43]
Linha de Sintra	25	Viaduto da Ponte Nova	-	Lisboa	Substituída	38°43'11.2"N 9°10'25.0"W	[54] [55]
	26	Ponte de Sant'Anna de Baixo	Ribeira de Alcântara	Lisboa	Substituída	-	[54] [55]
	27	Ponte de Sant'Anna de Cima	Desconhecido	Lisboa	Substituída	38°43'42.1"N 9°10'15.3"W	[55]

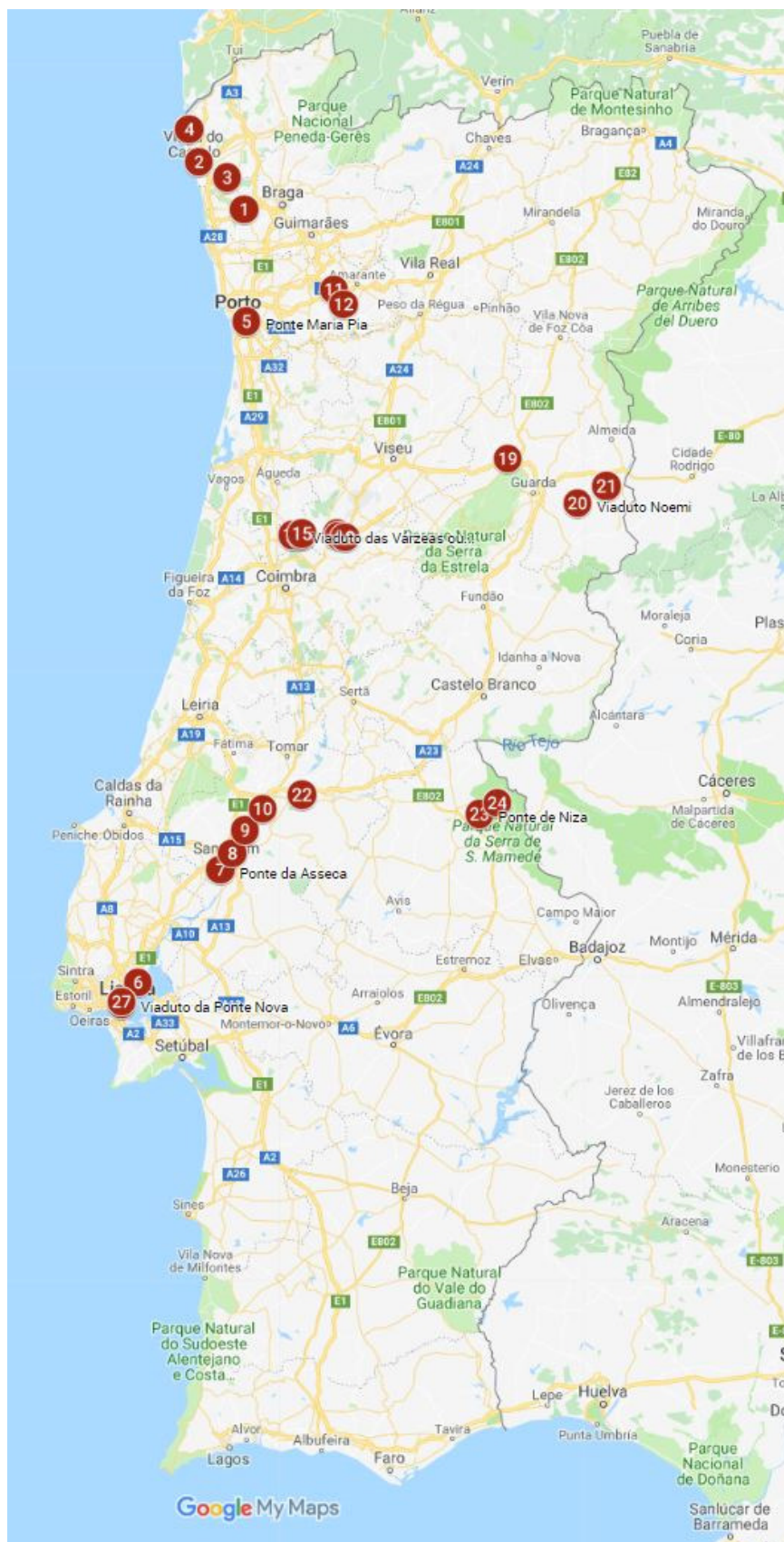


Figura 3.3 - Mapa com a localização das pontes da Casa Eiffel [56]

Espera-se que deste modo, a pesquisa aprofundada realizada, concorra para a correção de algum senso comum generalizado, que erroneamente considera que “todas” as pontes metálicas existentes em Portugal foram realizadas pela Casa Eiffel. Ficam assim, também, referências precisas para futuros trabalhos, contribuindo para uma melhor identificação nacional das obras da Casa Eiffel.

### **3.5. As pontes metálicas ainda existentes em Portugal**

Neste subcapítulo identificam-se as pontes metálicas projetadas e realizadas pela Casa Eiffel em Portugal e que chegaram até aos dias de hoje. Identificam-se as referências na imprensa à época durante a sua construção e inauguração. São também elencadas as suas características, contribuindo assim para uma definição mais pormenorizada das pontes existentes e da herança física e histórica deixada pela Casa Eiffel.

#### **3.5.1. Ponte de Viana do Castelo**

A Ponte de Viana do Castelo, agora denominada de Ponte Eiffel, foi inaugurada oito meses depois da Ponte Maria Pia, mais concretamente no dia 30 de junho de 1878 e era, à altura, a ponte mais comprida nos caminhos de ferro portugueses [57]. O custo final da obra ficou orçado em 322940\$239 réis [36]. Esta ponte foi a primeira construída em Portugal com duplo tabuleiro (Figura 3.4). Os tabuleiros têm uma distância aproximada de 7 m entre si, sendo o tabuleiro inferior destinado à passagem de comboios e o tabuleiro superior ao serviço pedonal e viação.



Figura 3.4 - Vista da Ponte de Viana do Castelo durante a sua construção [36]

Os tabuleiros têm uma extensão de 563 m. Nas margens, do lado de Viana do Castelo há um viaduto de 83 m e, do lado oposto, em Darque, há outro de igual dimensão. A ponte é constituída por duas vigas de ferro pudelado de 7,5 m de altura, ligadas na parte superior e inferior por montantes e por treliças de rótula dupla. O tabuleiro foi montado sobre uma plataforma de 200 m de extensão e foi lançado por três vezes por um sistema criado pela Casa Eiffel.

Para a realização das fundações, foi utilizado pela primeira vez, em Portugal, o método de caixões de ar comprimido, em profundidades que variavam entre os 20 e os 23 m, até atingir a camada rígida (*bedrock*) [28].

A ponte ainda hoje continua em funcionamento (Figura 3.5), tendo sido, contudo, objeto de várias reabilitações ao longo dos anos [58] [59] e apresenta restrições de velocidade do tráfego ferroviário.



Figura 3.5 - Ponte de Viana do Castelo [60]

### **3.5.2. Ponte Maria Pia**

A Ponte Maria Pia foi a primeira ponte ferroviária a atravessar o rio Douro e toda sua estrutura é reticulada. A sua inauguração foi realizada a 4 de novembro de 1877 [61], em honra de Dona Maria Pia de Saboia.

Projetada e construída pela Casa Eiffel (Figura 3.6), a ponte situa-se entre as estações de Devesas, em Vila Nova de Gaia, e Campanhã, no Porto. O tabuleiro é de via única e de bitola ibérica, com uma dimensão de 354,375 m, o qual apoia sobre o arco semicircular com 160 m de



corda e sobre três pilares do lado de Vila Nova de Gaia e dois pilares do lado do Porto, existiam ainda dois pilares de cada lado apoiados sobre o arco [40].

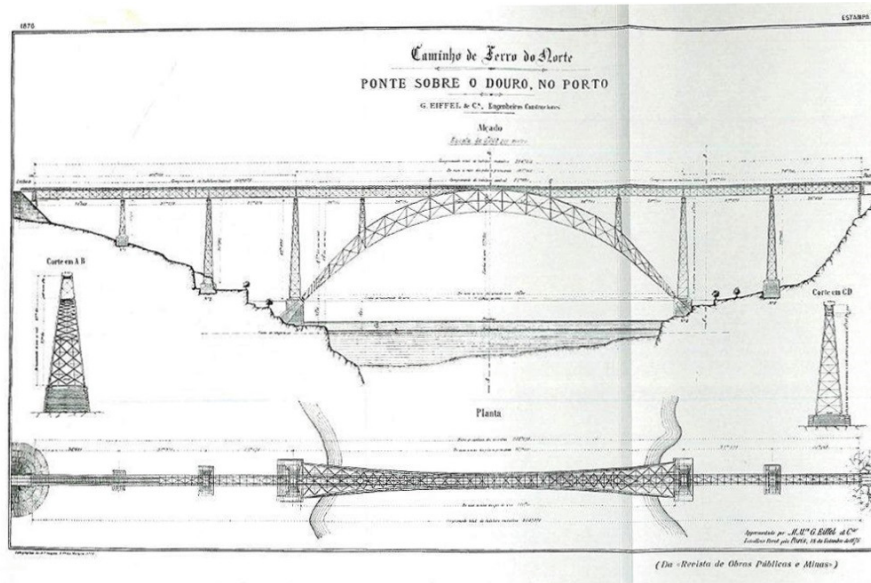


Figura 3.6 - Ponte Maria Pia na entrada em serviço [62]

Em 1983 recebeu o estatuto de Monumento Nacional e, em 1990, a *American Society of Civil Engineers* atribuiu à Ponte Maria Pia o título de “*International Historic Civil Engineering Landmark*”, sendo a única obra portuguesa a constar desta lista. Desde 1991, a ponte encontra-se desativada, existindo muitos projetos para a sua reafecção a novas atividades (Figura 3.7).



Figura 3.7 - Vista atual da Ponte Maria Pia

### 3.5.3. Ponte do Alviela

A Ponte do Alviela na Linha do Norte foi inaugurada a 8 de abril de 1893 (Figura 3.8) e tem uma extensão de 60 m. A sua construção deveu-se à duplicação da via na Linha do Norte, que até aquela data era de via única. No âmbito de uma reabilitação recente (Figura 3.9), para dar resposta às exigências do tráfego ferroviário atual, foi construído um pilar central em betão armado e as suas vigas principais foram reforçadas [37].

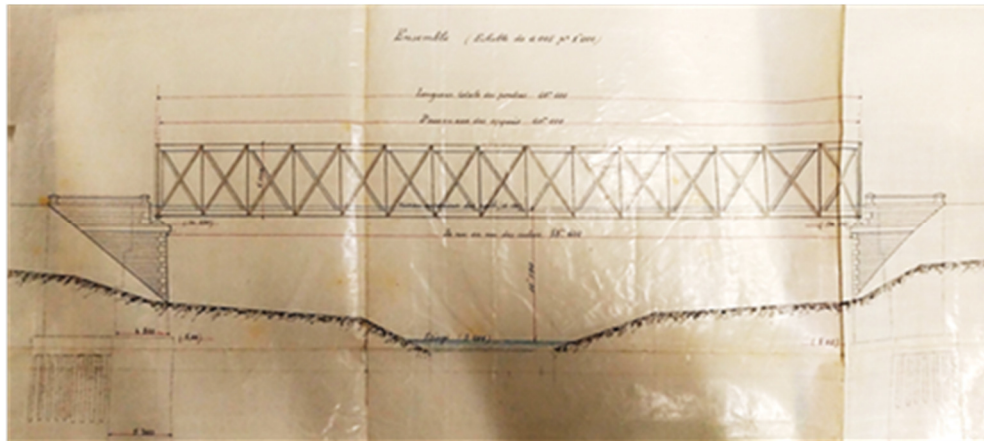


Figura 3.8 - Planta do projeto original da Ponte do Alviela [41]



Figura 3.9 - Vista atual da Ponte do Alviela [63]



### 3.5.4. Ponte da Praia

A Ponte da Praia (Figura 3.10) foi construída em 1887 pela Casa Eiffel, em substituição de uma ponte existente [52]. A ponte apresenta um comprimento total de 497 m, repartidos por oito tramos contínuos e um tramo simplesmente apoiado do lado de Badajoz. As vigas principais têm uma altura de 6,0 m e um afastamento entre elas de 4,9 m. Com a construção desta ponte, foram aumentadas as distâncias entre os pilares, em relação à ponte antiga, sendo estes construídos em alvenaria [64].

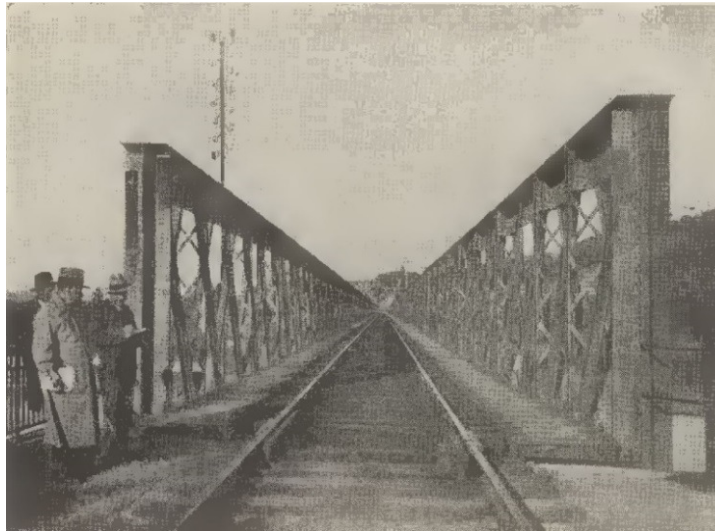


Figura 3.10 - Vista da Ponte da Praia na sua inauguração [65]

Em 1979 a ponte foi desativada. Posteriormente, em 1988, a mesma foi reconvertida para circulação rodoviária, para o qual foi necessário construir um tabuleiro em betão, cuja largura reduzida só permite a circulação numa via (Figura 3.11), sendo os sentidos alternados garantidos através de sinalização luminosa [37].



Figura 3.11 - Ponte da Praia



### **3.6. Considerações finais**

Este capítulo descreve a vida e obra de Gustave Eiffel, o seu percurso diversificado, desde a sua formação na Ecole Centrale des Arts et Manufactures na área de Química, à experiência profissional na área da metalurgia, na fundição de alto-forno Châtillon-sur-Seine, complementado pelo exemplo dos seus mentores, Charles Nepveu na área de projeto e construção de motores a vapor para locomotivas e Eugène Flachet, da Compagnie des Chemins de Fer, na introdução do ferro fundido fixado com rebites. Toda esta diversidade contribuiu para o desenvolvimento do rigor científico de Gustave Eiffel, da sua capacidade de gestão e organização, que lhe permitiram construir rapidamente as suas obras através de métodos construtivos inovadores, como por exemplo a realização de fundações de pilares por caixões de ar comprimido e o lançamento de tabuleiros a partir das margens, bem como a sua passagem por Barcelos

É referida a sua permanência em Portugal, em Barcelinhos, sendo apresentada uma lista detalhada das 27 pontes com comprimento superior a 20 m, realizadas pela Casa Eiffel e a sua localização. É feita ainda uma descrição das quatro pontes remanescentes do legado da Casa Eiffel, nomeadamente, as pontes de Viana do Castelo, Maria Pia, do Alviela e da Praia. São enumeradas também as fontes bibliográficas que estiveram na base deste estudo, nomeadamente os projetos e contratos originais existentes no Arquivo da IP, bem como as revistas “O Occidente”, “Gazeta dos Caminhos de Ferro” e “Boletim da C.P.”.



# **Materiais, Soluções Construtivas e Métodos de Dimensionamento**

## **4.1. Considerações iniciais**

No presente capítulo aborda-se o estudo dos materiais, das soluções construtivas e dos métodos de dimensionamento usados na segunda metade do século XIX e em particular nas pontes da Casa Eiffel.

Começa-se por uma apresentação dos materiais e das características físicas e de resistência exigidas na altura para a sua aplicação em pontes metálicas. Note-se que o metal e o betão apresentavam características bastantes diferentes das atuais. Posteriormente, são apresentadas as soluções construtivas dos vários componentes das pontes metálicas, desde fundações, pilares, arcos, tramos, vigas, treliças, longarinas, carlingas, apoios, rebites e parafusos. Para cada um destes elementos, sempre que possível, é descrita a sua instalação e as exigências, na altura, para o controlo da qualidade. Adicionalmente, é dada particular atenção aos métodos de dimensionamento e aos cálculos justificativos para alguns componentes das pontes, nomeadamente vigas, treliças, montantes, longarinas e carlingas. Finalmente, e de forma sumária, são também apresentados os ensaios de receção realizados nas pontes, no qual se engloba os ensaios de carga estáticos e dinâmicos.

Todas as descrições de elementos constitutivos das pontes, os métodos de dimensionamento e os cálculos justificativos são acompanhados de fotografias retiradas dos projetos originais, existentes no Arquivo da IP, consultados pelo autor.

## 4.2. Materiais

Abordam-se, de seguida, os materiais estruturais usados à época, nomeadamente o tipo, as características físicas e a resistência. Note-se que o metal e o betão apresentavam características bastantes diferentes das atuais.

### 4.2.1. Metálicos

Os metais empregues na construção civil no século XIX ainda estavam num processo muito inicial, o que conduzia a que estes apresentassem características resistentes muito diferentes das atuais. De seguida explicam-se as principais características do ferro pudelado e do ferro fundido. É de salientar que o emprego de aço na construção de pontes metálicas surge só no início do século XX, não sendo assim abordado neste estudo.

Na utilização dos metais exigiam cuidados especiais preventivos do processo de oxidação. Assim, com o objetivo de ultrapassar este problema, as peças metálicas eram sujeitas a um tratamento, que às palavras da altura eram assim tratadas “*as peças de metal deverão sair da fábrica sem qualquer oxidação aparente e devem estar cobertas por uma camada de pintura de primário anticorrosivo (minium de chumbo) e no caso de apresentar sinais de oxidação, esta oxidação deverá ser retirada por completo antes da aplicação da tinta final*” [19]. Também, após a montagem do tabuleiro era aplicada uma pintura em duas camadas sucessivas, cuja cor e composição eram indicadas posteriormente pelos responsáveis da obra.

#### 4.2.1.1. Ferro pudelado ou forjado

O ferro pudelado ou forjado (ver Figura 4.1) é um metal de transição entre o ferro e o aço atual que recorria à cravação de rebites, de modo a formar ligações e perfis compostos [37]. Em termos de características mecânicas exigidas em projeto de pontes ferroviárias construídas nessa época, o ferro pudelado deveria suportar um esforço máximo de  $6 \text{ kg/mm}^2$  (coeficiente máximo de trabalho\*) à tração e à compressão, sendo à flexão o mínimo exigido de  $4 \text{ kg/mm}^2$ . O seu aspeto deveria ter uma textura com nervuras, não deveria ser quebradiço nem apresentar defeitos interiores e exteriores, de qualquer natureza, demonstrando serem bem fabricados e de boa qualidade. Em ensaios isolados de controlo de qualidade, o ferro pudelado deveria suportar à tração sem romper  $32 \text{ kg/mm}^2$ ; o aspeto da rotura também era observado, de modo a que apresentasse todas as características que revelassem boa qualidade. A sua geometria era controlada, pois deveria ter uma espessura uniforme, onde era concedida uma tolerância de  $1 \text{ mm}$  de desvio [18] [19].

---

\* Equivalente à tensão admissível nos dias de hoje



Figura 4.1 - Aspeto do ferro pudelado: heterogêneo, anisotrópico e frágil [66]

Os valores característicos atualmente adotados em análises preliminares de uma determinada ponte metálica são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas do ferro pudelado [14]

Simbologia	Propriedade	Valor	Unidade
$f_y$	Tensão de cedência	220	N/mm <sup>2</sup>
$f_u$	Tensão de rotura	320 a 380	N/mm <sup>2</sup>
E	Módulo de elasticidade	200	kN/mm <sup>2</sup>
G	Módulo de distorção	77	kN/mm <sup>2</sup>
Y	Peso volúmico	78	kN/mm <sup>3</sup>
$\lambda_{10}$	Extensão última na direção da laminagem para o ferro pudelado	12	%
$\lambda_5$	Extensão última na direção da laminagem, para aços antigos	15	%

Os valores das tensões de rotura, cedência e da extensão última na direção transversal têm valores bastante menores que na direção longitudinal. O ferro pudelado anterior a 1930, de um modo geral, não permitia a realização de soldaduras.

#### 4.2.1.2. Ferro fundido

O ferro fundido era de segunda fusão e de melhor qualidade, bem compacto, homogêneo, sem fendas, bolhas ou outros defeitos que pudessem alterar a sua resistência mecânica e perfeição das formas. Eram exigidas as seguintes características mecânicas: resistência a um esforço máximo de 2 kg/mm<sup>2</sup> à tração e de 6 kg/mm<sup>2</sup> à compressão; deveria ser suscetível de ser trabalhado com o buril, com a broca e com a lima; e a sua fratura deveria

apresentar um grão fino de cor cinzenta. Nas pontes metálicas da Casa Eiffel era feita utilização do ferro fundido, principalmente nas uniões entre peças de ferro pudelado (por exemplo na união das barras das treliças com as vigas principais) e nos apoios.

#### **4.2.2. Madeira**

A madeira de carvalho era utilizada nas travessas da via-férrea do tabuleiro. As travessas deveriam ser bem esquadriadas e sãs. As peças de madeira eram cobertas com três camadas sucessivas de alcatrão vegetal de primeira qualidade, misturado com ocre vermelho ou cal em pó. Cada camada de alcatrão era aplicada só quando a precedente estivesse perfeitamente seca. As peças de madeira deveriam ser bem limpas antes da aplicação da primeira camada de alcatrão. O alcatrão era aplicado quando este estivesse em ebulição e durante o tempo seco.

#### **4.2.3. Betão**

O betão hidráulico era fabricado em estaleiro e deveria ser realizado *“com o maior esmero, sendo a mistura dos materiais que o compõem tão íntima e homogéneas quanto possível”*. Os agregados utilizados tinham proveniência de locais perto da execução da ponte. Ao longo da pesquisa deste trabalho o betão (beton, termo usado na época devido à influência francesa) foi referenciado na execução de pilares tubulares [19].

#### **4.2.4. Argamassa**

No fabrico de argamassas empregava-se a cal e pozolana dos Açores que, misturadas, se usavam como cimento hidráulico. A pedra britada era de seixo rolado ou de agregado de pedreira na proximidade da obra. As suas características físicas deveriam obedecer a critérios pré-determinados, como os fragmentos bem angulosos e passarem no peneiro de abertura de 50 mm [19], para utilização na execução de encontros, pilares e bases de pilares metálicos.

#### **4.2.5. Alvenaria**

A alvenaria são elementos estruturais formados por pedras, onde as suas faces estão todas aparelhadas, justapostas e a junta tem uma espessura reduzida. Havia a preocupação de que a alvenaria deveria ser da melhor qualidade e obtida das melhores pedreiras, localizadas perto dos locais de trabalho. Era feita a sua utilização nas faces exteriores dos encontros, pilares e bases de pilares metálicos.

## 4.3. Soluções construtivas

### 4.3.1. Pilares

#### 4.3.1.1. Pilares tubulares mistos

Gustave Eiffel utilizou uma única vez em Portugal os pilares tubulares, mais concretamente na Ponte de Barcelos. A sua utilização foi abandonada e passaram a ser construídos pilares em alvenaria ou metálicos.

Os pilares tubulares, representados na Figura 4.2, eram formados por duas colunas tubulares cheias de betão hidráulico, com um diâmetro de 2,20 m, contraventados por travessas em ferro pudelado de 5,0 em 5,0 m e no intervalo destas eram usadas cruces de Santo André. Os tubos de revestimento do betão eram de folha de ferro cravada, com 10 mm de espessura.

No seu topo, os pilares tubulares têm duas fiadas de alvenaria assentes no betão, as quais recebiam os aparelhos de apoio. O alinhamento dos pilares era realizado no sentido da corrente.

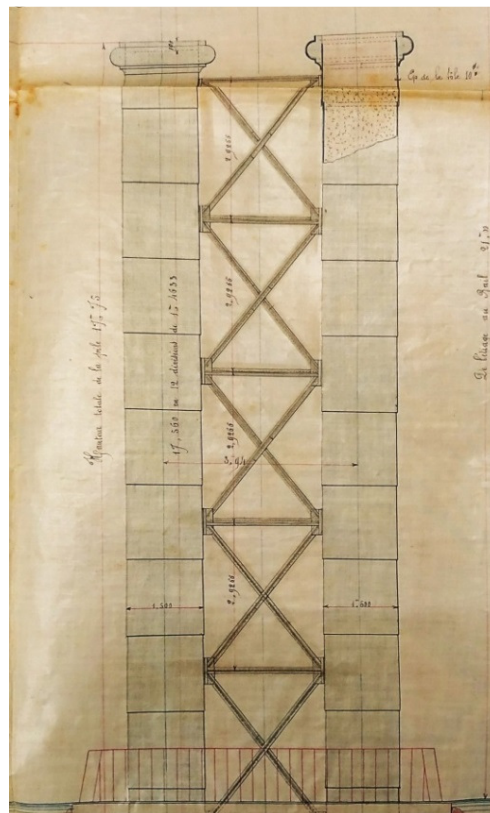


Figura 4.2 - Pilares tubulares da Ponte de Barcelos [19]

#### 4.3.1.2. Pilares metálicos

A primeira vez que Eiffel usou pilares metálicos em Portugal foi na Ponte Maria Pia, voltando mais tarde a usar esta solução sempre que existisse a necessidade de pilares mais altos e esbeltos. Cada pilar (Figura 4.3) era formado por quatro perfis, em forma de caixa, sendo estes constituídos por quatro lâminas planas de espessura variável, unidas por cantoneiras. Os perfis eram unidos por treliças e travessas colocadas no plano das suas faces. Existiam também contraventamentos horizontais colocados em cada topo das Cruzes da face. No interior dos pilares recorria-se também a Cruzes para unir os quatro perfis [1] [28].

As secções dos pilares tinham uma forma retangular, em que as faces maiores eram no sentido transversal da ponte, diminuindo a sua secção em altura. Na mesma ponte e com diferentes alturas de pilares, a secção dos mesmos nos topos era idêntica em todos eles.

Nos topos dos pilares, os perfis eram unidos por um coroamento rígido, sobre as faces menores do pilar. O coroamento que suportava os apoios do tabuleiro era em forma de caixa.

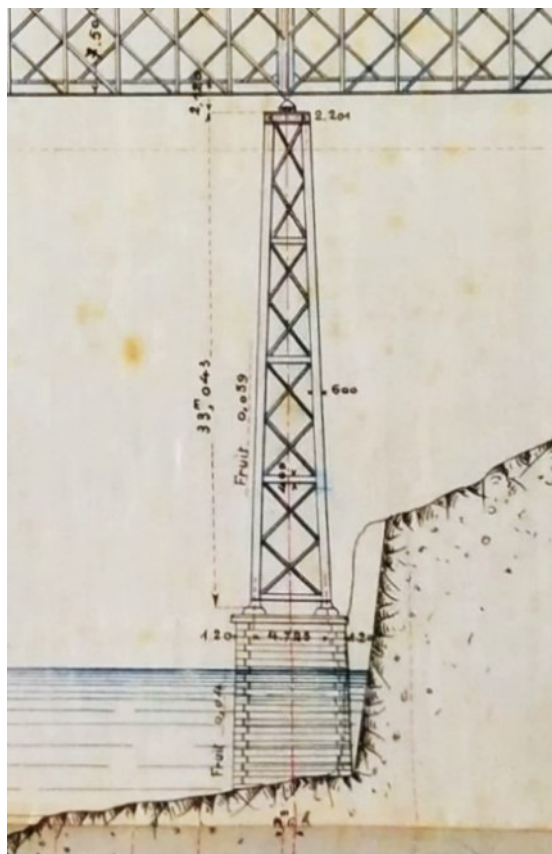


Figura 4.3 - Pormenor de pilar metálico Ponte do Dão [4]

Na base dos pilares, os apoios dos perfis eram feitos sobre a alvenaria através de uma chapa metálica. No interior dos perfis era formado um invólucro que recebia um suporte em



ferro fundido do tirante de amarração (Figura 4.4). Esse tirante em ferro com secção redonda, com um diâmetro na ordem dos 90 mm, descia pela alvenaria até uma profundidade na ordem dos 5 m e, a esse nível, era atravessado por um *sommier* de ferro que atravessa a sapata e recolhia as cabeças dos dois tirantes no alinhamento da pequena face. Por baixo dos *sommiers* eram usadas cunhas, que asseguravam o aperto dos tirantes.

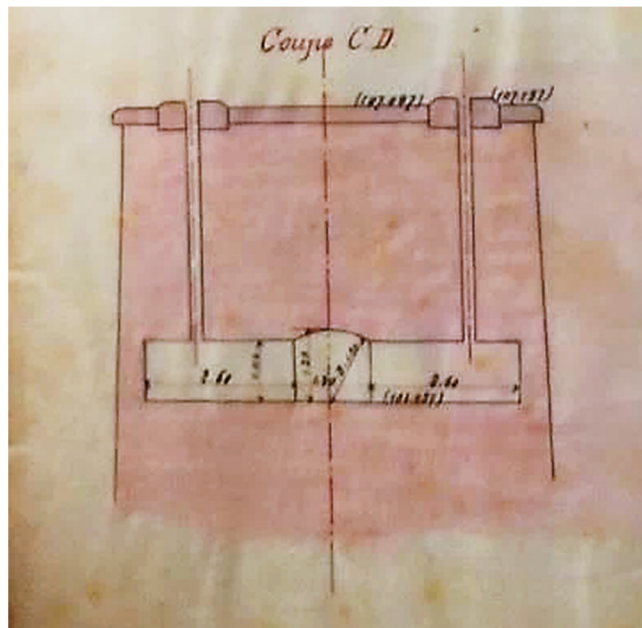


Figura 4.4 - Pormenor de amarração do pilar metálico [4]

No cálculo dos pilares metálicos que suportam o tabuleiro, existia a preocupação que estes deveriam resistir à compressão devido ao peso do tabuleiro e da sobrecarga. Era também já uma preocupação que estes deveriam resistir aos esforços de reversão produzidos pelo efeito do vento ao atuar horizontalmente.

#### 4.3.1.3. Pilares de alvenaria

Os pilares de alvenaria de pedra aparelhada apresentavam um aspeto muito semelhante ao das cantarias, mas em que o aparelhamento da pedra era feito só nas faces visíveis. As faces interiores das pedras, bem como as pedras do interior do elemento estrutural, não eram aparelhadas. Para ligar essas pedras no interior era utilizada argamassa.

De um modo geral, era utilizado este tipo de pilar quando existia o contacto com a água. Na Figura 4.5 pode-se observar que já existia uma preocupação com a configuração dos pilares de modo a diminuir a pressão provocada pela ação hidrodinâmica.

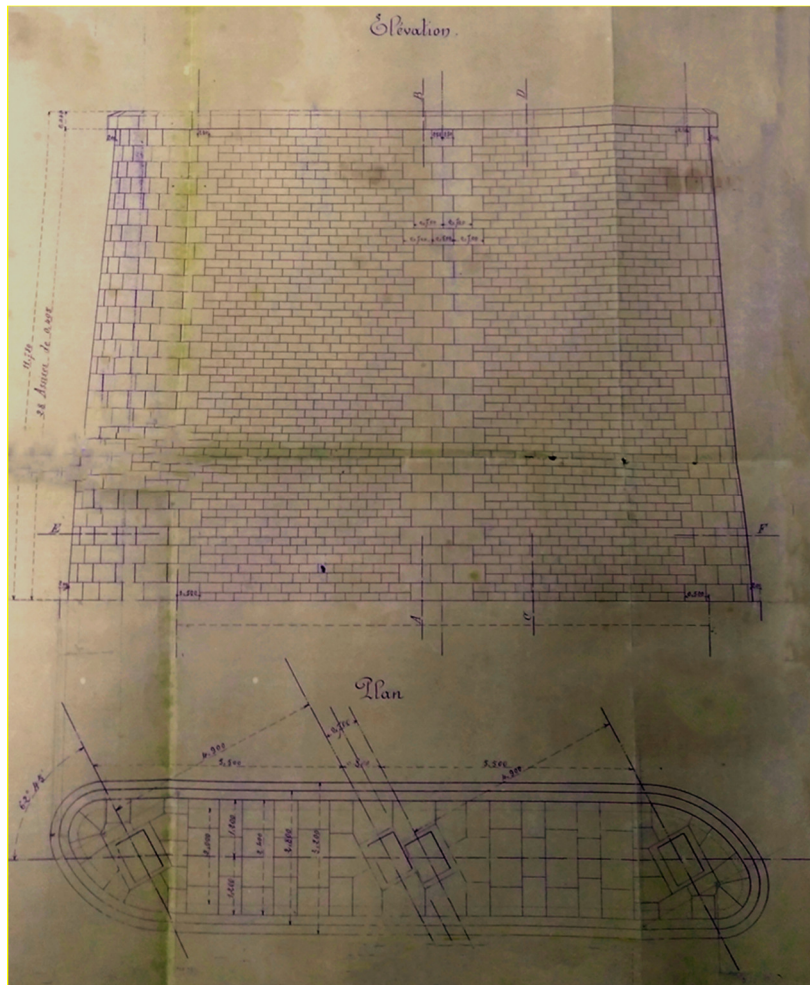


Figura 4.5 - Pilar de alvenaria [64]

### 4.3.2. Arcos metálicos

As primeiras pontes metálicas eram em forma de arco, podendo ser classificadas em dois tipos: arcos compactos e arcos treliçados.

Nos arcos compactos era utilizado o ferro fundido, que era um material com baixa resistência à tração, mas que, com esta configuração, usufruía da melhor característica do ferro fundido – o funcionamento à compressão.

Com a evolução dos processos siderúrgicos e o aparecimento de novos materiais, como o ferro pudelado, o qual possuía melhores características mecânicas, surgiram as pontes em arco treliçado com diversas configurações. Do ponto de vista estrutural, estas pontes patenteiam um arco formado por um caixão em treliça, constituído por quatro cordas (arestas), ligadas entre elas por treliças de contraventamento.

Os arcos estão sujeitos a esforços de compressão elevados, diferentes na zona central em relação às zonas laterais, e também às ações horizontais provocadas pelo vento. Por este

facto, na Ponte Maria Pia, Eiffel optou por um arco de secção variável (ver Figura 3.6), tendo o tabuleiro um tramo central de alma cheia, que passava no fecho do arco pelo seu interior, de modo a diminuir a superfície exposta à ação do vento. O restante tabuleiro era treliçado.

Em Portugal há dois exemplos de pontes com arcos treliçados – a Ponte Maria Pia e a Ponte Luiz I. Esta última foi construída mais tarde por Théophile Seyrig, após a sua saída da Casa Eiffel, motivada pela sua insatisfação com a partilha dos dividendos materiais e morais da realização do projeto da Ponte Maria Pia [67].

### 4.3.3. Fundações dos pilares

As fundações dos pilares assentavam na rocha e eram executadas com recurso à técnica de caixões de ar comprimido, sendo de seguida explicado o procedimento utilizado (Figura 4.6) e a sua origem.

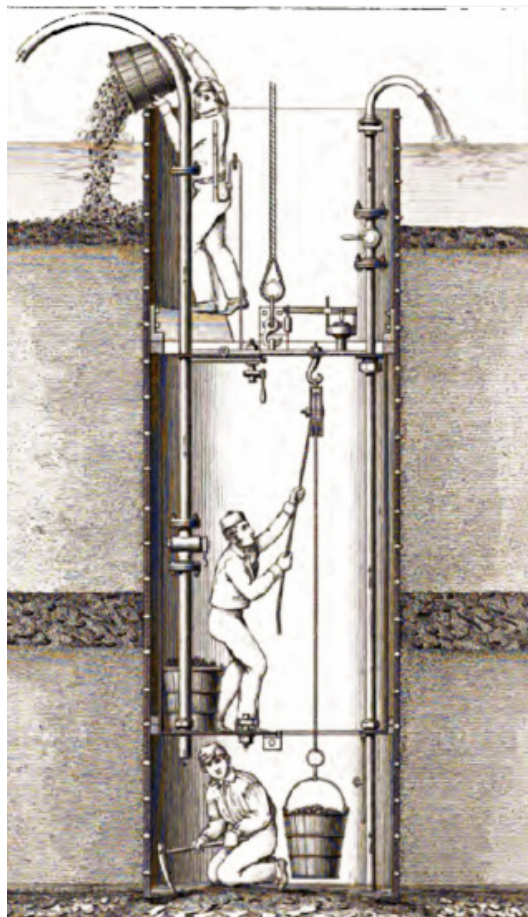


Figura 4.6 - Fundações realizadas através caixões de ar comprimido [68]

Esta técnica foi inventada pelo engenheiro francês Jacques Triger [69] na década de 40, do século XIX. A técnica começou por ser utilizada em minas de carvão, mas depressa foi aproveitada e adaptada na concretização de fundações de pilares em pontes. Conforme se

observa na Figura 4.6, esta técnica consistia na utilização de um cilindro de chapa de ferro fundido de 12 mm de espessura, 1 metro de diâmetro, 20 metros de comprimento, chamado de caixão que servia de involucro e ficava embutido no aluvião. Era dividido em três compartimentos horizontais, onde o do meio era hermético e servia de câmara de equilíbrio da pressão do ar; o compartimento inferior era a zona onde estavam os trabalhadores, que procediam à retirada de solo, o que permitia com essa ação o afundamento do cilindro, o trabalho era concluído quando fosse atingido a camada rígida, denominada de *bedrock*, sendo a zona onde se encontra a rocha dura.

Um motor a vapor composto por duas bombas produzia o ar comprimido para pressurizar o compartimento inferior, com uma pressão de 3 a 4 bar, permitindo o equilíbrio com as águas externas (pressão hidrostática).

Gustave Eiffel [70] é o autor de um estudo “Le fonçage par pression hydraulique des piles”, onde demonstra a introdução do novo procedimento e a sua nova técnica. O inconveniente desta técnica é estar associado a más condições de trabalho, que podiam originar problemas de saúde. Por exemplo, para se atingir uma profundidade de 25 m abaixo do nível de água, a pressão de ar instalada no caixão teria de ser de 2,5 bar ou 0,25 MPa.

Por fim, as fundações eram protegidas exteriormente, até ao nível da estiagem, para evitar a erosão devido à ação hidrodinâmica, sendo rodeadas por enrocamento de pedra solta, acamada tão perfeito quanto possível. Para o preenchimento dos pilares era usado alvenaria bruta e betão hidráulico. Na Figura 4.7 pode-se observar os pormenores do projeto da Ponte de Barcelos.

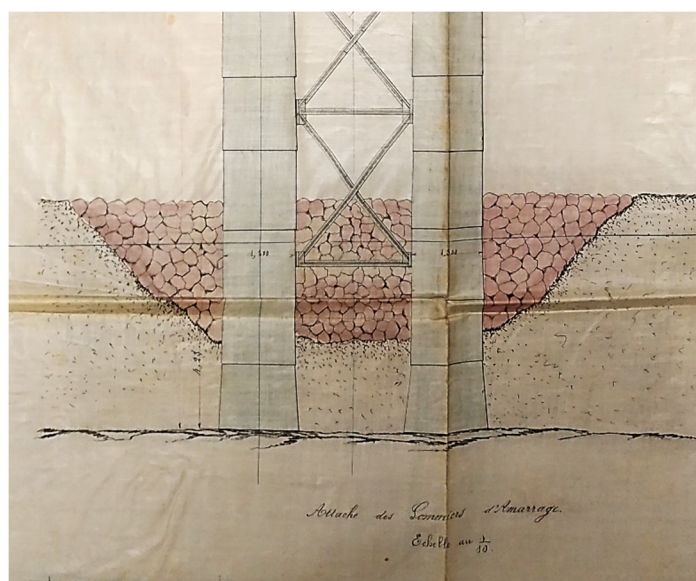


Figura 4.7 - Pormenor da fundação dos pilares [19]



#### 4.3.4. Encontros

Os encontros eram estruturas feitas em alvenaria e, por vezes, a sua secção era vazada. A secção vazada era preenchida por agregado grosso e, na base, conforme se pode observar Figura 4.8, existia o cuidado de promover a drenagem, quer através de um canal como se pode observar, quer através de uma superfície drenante, situada à esquerda na mesma figura e a cinzento.

As fundações dos encontros, tal como nos pilares, eram feitas sobre rocha. O revestimento do encontro era feito em alvenaria de pedra, em que a face exterior era aparelhada e a face interior não.

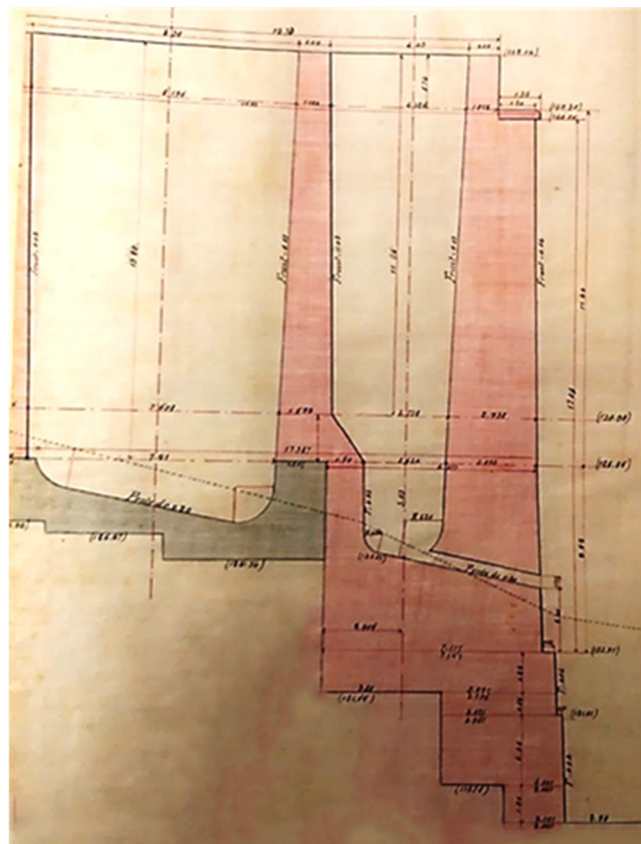


Figura 4.8 - Pormenor da secção vazada dos encontros e a sua drenagem [4]

#### 4.3.5. Tramos

As extensões dos tramos adotados por Eiffel variam entre os 20 m, no Viaduto da Ponte Nova, e os 75 m da Ponte do Dão. Os tramos extremos eram sempre mais curtos, assumindo comprimentos entre 77% e 92% dos tramos intermédios. Esta configuração deve-se ao facto de assim se conseguir reduzir os momentos atuantes sobre os apoios dos pilares dos extremos, pois

com esta diferença de comprimento obtém-se um equilíbrio dos momentos nesses pontos. Este aspeto será apresentado em pormenor no Capítulo 5.

#### 4.3.6. Vigas principais

Todas as pontes feitas pela Casa Eiffel em Portugal eram constituídas por vigas formadas por um banzo superior e um inferior, cada banzo unido a uma alma por duas cantoneiras. Essas peças eram rebitadas formando assim, secções em forma de T, e eram ligadas entre si por treliças e montantes verticais com um determinado espaçamento.

Era definida uma secção base da viga através do dimensionamento e os banzos eram reforçados nos pontos em que o cálculo o exigia, nomeadamente nos apoios que se encontravam na zona dos pilares, na zona dos encontros e a meio vão, tal como se observa na Figura 4.9, em que existe uma secção base, à qual eram acrescentadas chapas para compensar o aumento do momento atuante. Essas chapas suplementares (Figura 4.10) eram da mesma largura da secção e as suas espessuras variáveis.

Na Figura 4.9 pode-se observar ainda do lado esquerdo o cálculo de esforço devido ao lançamento do tabuleiro na fase de construção (ver subcapítulo 4.3.11), o qual é referenciado por “Courbe de lançage”.

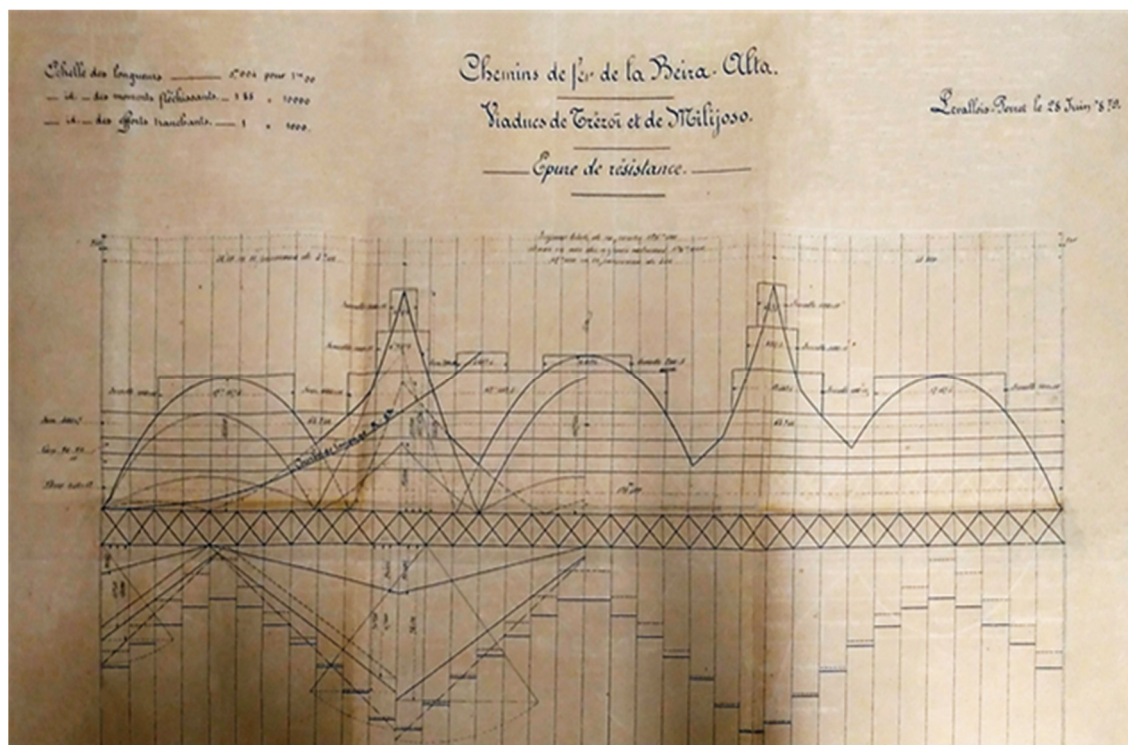


Figura 4.9 - Pormenor do reforço das vigas por chapas suplementares à secção constante [71]

A espessura das chapas era calculada do seguinte modo: calculava-se o aumento do momento resistente que corresponde a 1 mm de espessura de chapa, fazendo a divisão pelo resultado do excesso do momento atuante sobre o momento resistente; o resultado era obtido em milímetros, correspondendo à espessura das chapas suplementares. Nas vigas, existia a preocupação de no cálculo da resistência ser considerado a área perdida com a furação para a aplicação dos rebites.

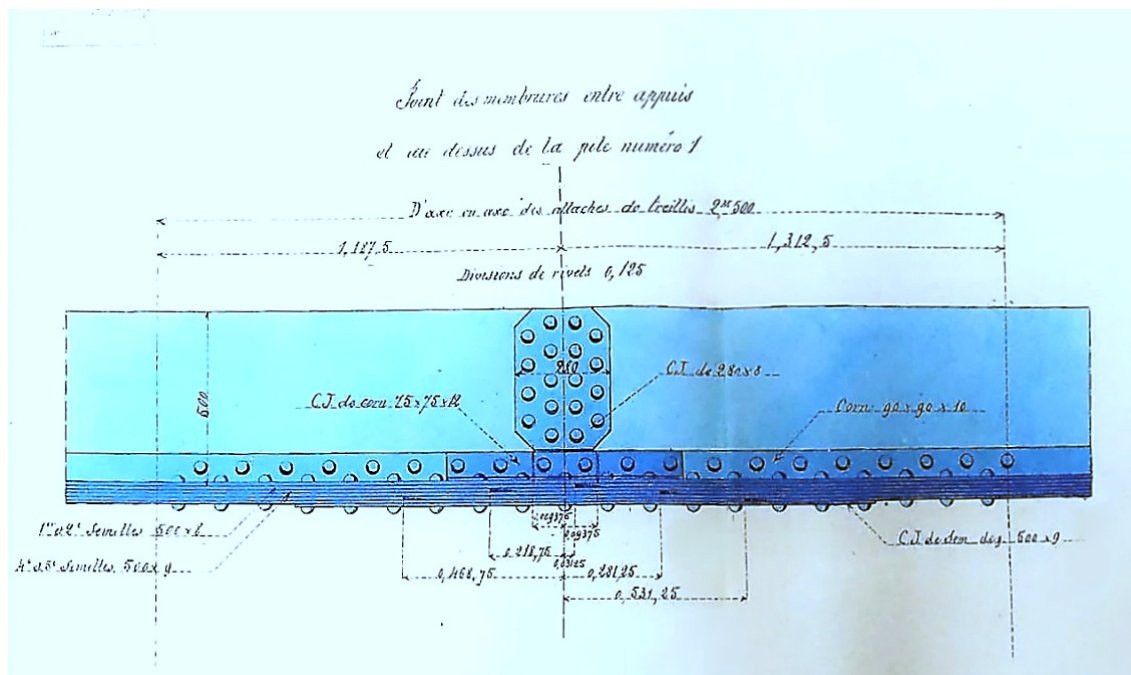


Figura 4.10 - Pormenor de um banzo inferior reforçado com chapas suplementares [64]

O contraventamento entre vigas era completado horizontalmente por dois sistemas de cantoneiras cruzadas. No caso das pontes com tabuleiros superiores e inferiores, sua disposição era feita no banzo superior e outro no banzo inferior da viga, conferindo-lhe uma maior rigidez horizontal, necessária quando se tinham de vencer grandes vãos.

### 4.3.7. Treliças

Às diagonais que unem as secções em T das vigas, dá-se o nome de treliças. As diagonais simples designam-se por Cruzes de Santo André simples e as diagonais duplas por treliças duplas (Figura 4.11); no caso de as diagonais terem um número superior dá-se o nome de treliças múltiplas.

As barras são unidas entre elas a cada cruzamento e são solidamente ligadas aos montantes, a cada atravessamento, constituindo as faces verticais das vigas. As barras das treliças são colocadas de modo tal, que possam por si só resistir aos esforços transversos a que estão sujeitas pela influência das cargas.



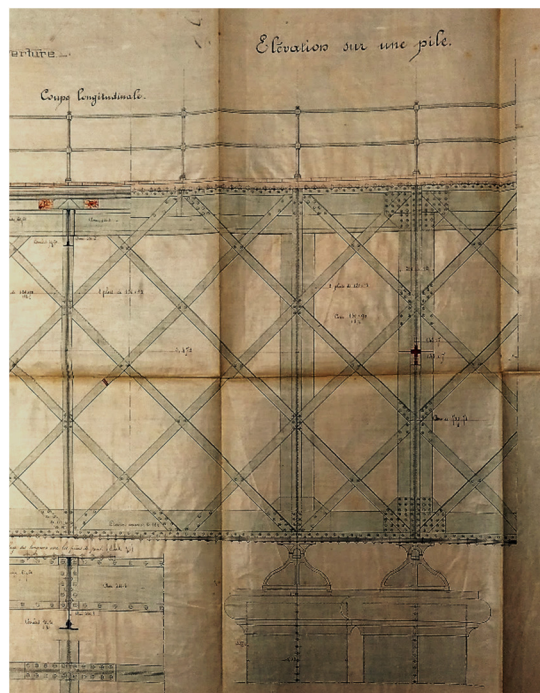


Figura 4.11 - Aspeto de treliças duplas e montantes [19]

As treliças eram formadas por perfis de ferro pudelado que poderiam ter várias configurações (Figura 4.12). As treliças poderiam por exemplo ter uma secção em “T”, constituída por uma chapa e duas cantoneiras, justa postas de maneira a formar a secção pretendida, ou poderiam ainda ter uma secção em “L”, constituída por uma chapa e uma cantoneira.

Tableau des treillis.

Composition des barres	Section brute.	Section nette.	Coefficient de travail.
1 Angle 120 x 12 2 Cornes 100 x 100 x 15	8.790 <sup>m</sup>	7.688 <sup>m</sup>	11,9
1 Angle 120 x 15 2 Cornes 100 x 100 x 14	7.908	6.919	11,9
1 Angle 170 x 12 2 Cornes 100 x 100 x 13	6.552	5.721	11,9
1 Angle 180 x 12 2 Cornes 90 x 90 x 11	5.518	4.736	11,9
1 Angle 180 x 12 2 Cornes 80 x 80 x 10	4.440	3.701	11,9
1 Angle 180 x 10 2 Cornes 70 x 70 x 8	3.312	2.766	11,8
1 Angle 180 x 10 1 Cornes 70 x 70 x 8	2.256	1.878	11,11

Figura 4.12 - Exemplo de tabela com secções de treliças em “T” e em “L” [64]



### 4.3.8. Carlingas e longarinas

As vigas principais eram ligadas entre si por carlingas (Figura 4.26). As longarinas eram ligadas aos montantes das carlingas. Sobre as longarinas assentavam as travessas de madeira de carvalho do Norte, com os espaçamentos utilizado na via corrente. No dimensionamento da superestrutura, as longarinas consideravam-se encastradas nas carlingas.

As carlingas e longarinas tinham a forma de uma alma e duas cantoneiras justa postas, mas também poderiam utilizar a forma de pequenas vigas treliçadas.

### 4.3.9. Aparelhos de apoio

Os aparelhos de apoio utilizados pela Casa Eiffel eram de dois tipos: apoios fixos, que permitem a rotação, e apoios móveis que, além da rotação, permitem também os deslocamentos horizontais. Na fixação dos apoios sobre a alvenaria, existia o cuidado de ser utilizada uma lâmina de chumbo com cerca de 1,0 mm, com o objetivo de retirar as irregularidades das pedras de alvenaria onde assentavam.

Os apoios fixos eram constituídos por placas em ferro fundido rotulados, que permitiam às vigas principais a existência de inclinação resultante da flexão. Os apoios móveis eram compostos por duas placas fixadas, uma na alvenaria ou base metálica e outra no banzo inferior da viga. Entre estas placas trabalham uma serie de balanceiros, entre quatro e seis, com um diâmetro na ordem dos 100 mm, que permitiam os deslocamentos das extremidades da ponte para acomodar as dilatações térmicas.

Este sistema assegurava sempre a passagem pelo eixo do montante, a reação do apoio, uma condição importante para o trabalho em estruturas metálicas. Além disso, os apoios garantiam uma distribuição uniforme da carga em todos os rolos.

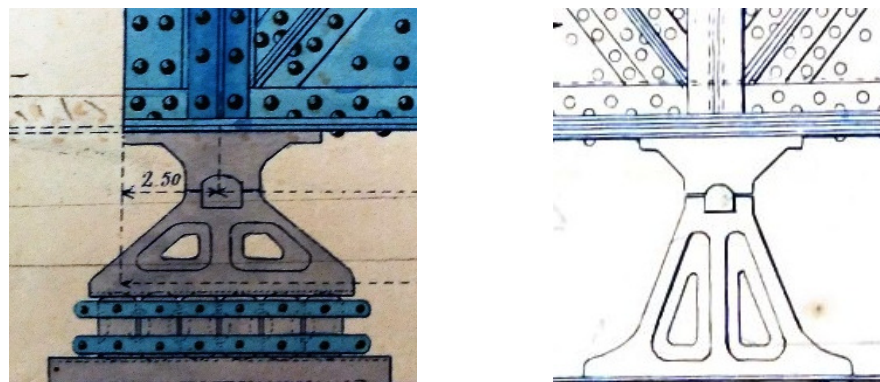


Figura 4.13 - Representação de aparelho apoio móvel (à esquerda) e fixo (à direita) [64]

#### 4.3.10. Rebites e parafusos

Os rebites e parafusos tinham como função realizar as ligações entre os vários componentes integrantes da ponte. Era exemplo disso a ligação entre as carlingas e as vigas. Também se utilizavam na criação de perfis.

As ligações eram simples e realizadas através de eixos perfurados (furos). Os rebites de cabeça redonda eram introduzidos nos furos dos elementos a montar e, de seguida, rebitados por forma a impedirem o movimento lateral dos elementos.

Eiffel começou a utilizar rebites após a utilização por Flachat, que foi o pioneiro em França na introdução do ferro fundido fixado com rebites, em substituição de pinos utilizados até 1850 [31]. A utilização de rebites prolongou-se até cerca de 1930 [11].



Figura 4.14 - Aspeto de um rebite antes da sua utilização

A Figura 4.15 ilustra a instalação de um rebite. Nas memórias descritivas dos projetos elaborados pela Casa Eiffel, era descrita a técnica a ser utilizada na cravação dos rebites, que de seguida se transcreve [19] [72]. A Figura 4.15 ilustra a instalação de um rebite.

*“Os furos para os rebites e parafusos serão feitos mecanicamente e não deverão apresentar rebarbas, de modo a que as peças furadas possam assentar bem umas sobre as outras. As peças metálicas onde a junção das peças se fizesse no topo, esses serão bem desempenados.*

*Os diâmetros dos furos serão pouco maiores do que os rebites, cerca de 1 mm, aproximadamente, de modo a que estes possam entrar com a facilidade suficiente. As cabeças dos rebites deverão assentar em todo o seu perímetro e apertar fortemente as chapas de metal. Estas chapas deverão assentar igualmente em todos os seus pontos, umas sobre as outras.”* [19].

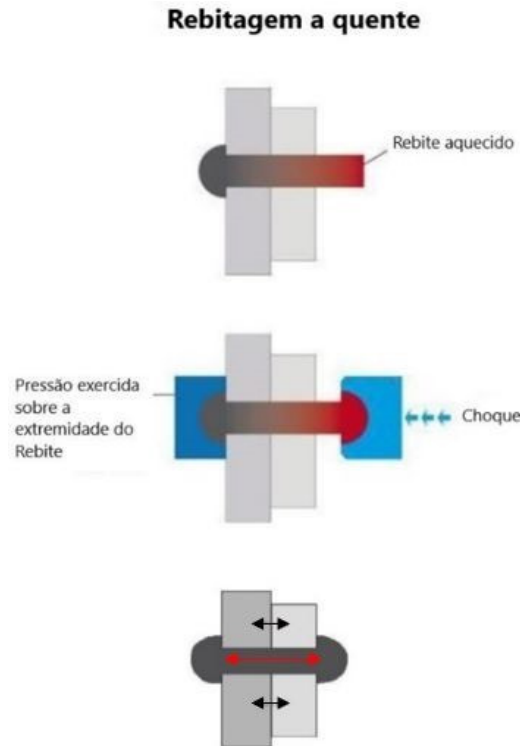


Figura 4.15 - Processo de rebiteagem [73]

A instalação de rebites era constituída pelas três fases descritas de seguida:

- Fase 1: O rebite, formado por uma haste com uma cabeça numa das extremidades, era aquecido a aproximadamente 1350 °C, altura em que adquiria um aspeto branco. De seguida era colocado num furo circular com mais um milímetro de diâmetro do que o rebite. A razão era respeitar o coeficiente de dilatação do aço.
- Fase 2: Era colocada uma peça adaptada à cabeça do rebite, que tinha como função garantir a resistência às pancadas dadas na outra ponta do rebite. Estas pancadas eram executadas com uma peça própria que, no fim do processo, dava à ponta do rebite a forma de uma segunda cabeça, ao mesmo tempo a haste do rebite preenchia a folga do furo.
- Fase 3: Após o rebite arrefecer, este iria contrair e apertar as peças metálicas da montagem [73].

Os rebites requeriam uma substituição periódica daqueles que se encontravam fragilizados. Por outro lado, os parafusos necessitavam de um reaperto periódico.

Na Figura 4.16 apresenta-se uma gravura feita por um técnico que visitou a Ponte do Dão, onde é feito um desenho com bastante pormenor dos rebites substituídos após uma

intervenção de manutenção da ponte. Podem observar-se as patologias mais frequentes de rebites de cabeça redonda, encontradas na altura da reabilitação dessa ponte.

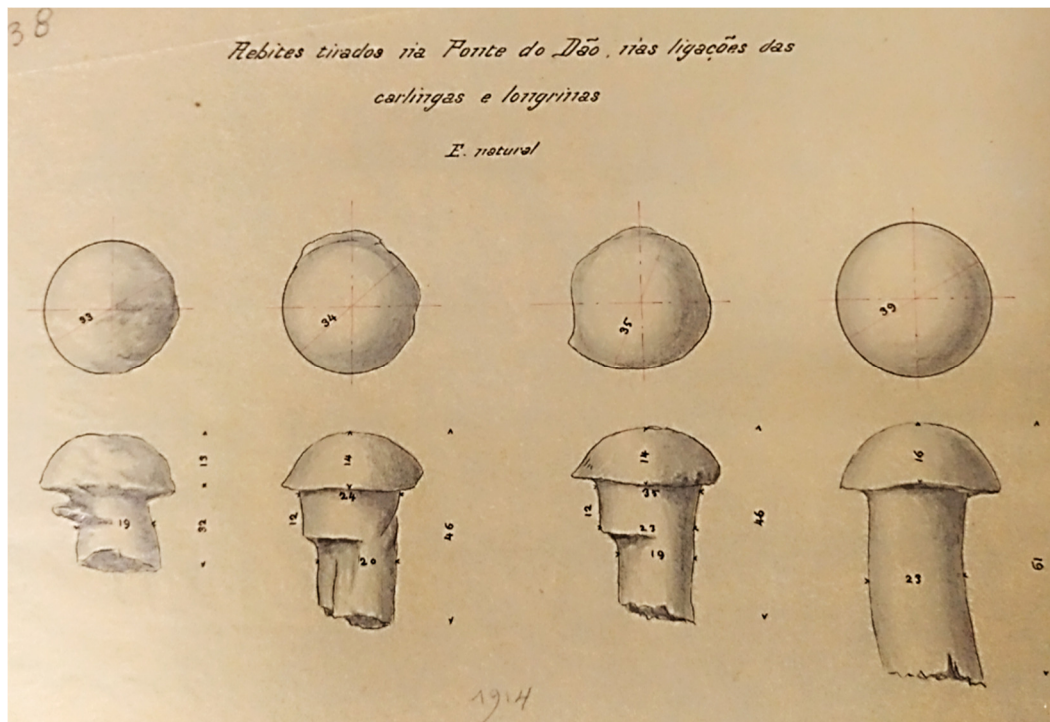


Figura 4.16 - Patologia de rebites de cabeça redonda da Ponte do Dão

#### 4.3.11. Lançamentos das estruturas metálicas

Na Figura 4.17 apresentam-se três fases do processo construtivo da Ponte Maria Pia, no Porto, em que o lançamento da estrutura metálica é feito a partir das margens do rio Douro e suspensos em cabos provisórios. Este processo foi aplicado nesta ponte pela primeira vez, sendo mais tarde utilizado noutras pontes, como é exemplo a Ponte Gabarit em França.



Figura 4.17 - Três fases do processo construtivo da Ponte Maria Pia [57]

A Casa Eiffel utilizava a técnica de lançamento da estrutura metálica, que era pré-montada em estaleiro e que de seguida, através de plataformas de lançamento, era colocada na posição final. Na Figura 4.18 pode-se observar o sistema utilizado pela Casa Eiffel.

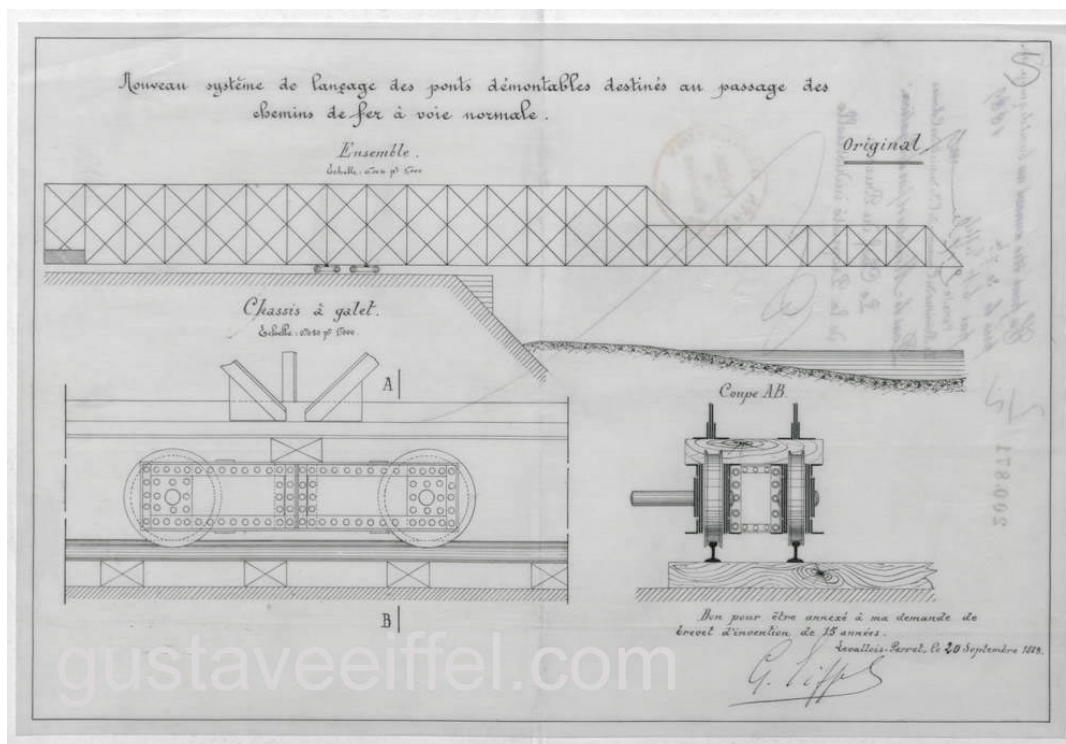


Figura 4.18 - Sistema de lançamento de pontes [74]

## 4.4. Métodos de dimensionamento e cálculos justificativos

Após a pesquisa e análise várias memórias descritivas e justificativas disponibilizadas pelo Arquivo da IP, considerou-se relevante expor as abordagens de dimensionamento, os métodos de cálculo e a regulamentação utilizados no dimensionamento estrutural das pontes da Casa Eiffel.

O coeficiente de trabalho para o ferro pudelado utilizado no dimensionamento, dos vários componentes integrantes de uma ponte metálica, era de  $6 \text{ kg/mm}^2$ . Este valor era exigido em todos os projetos elaborados pela Casa Eiffel à época.

### 4.4.1. Vigas principais

Na Figura 4.19 identificam-se os vários elementos constituintes de uma viga principal metálica da época. Atualmente todo o conjunto é denominado de “treliça”. Neste trabalho, dadas as referências da época foram denominadas treliças as diagonais de ligação entre os banzos.



Nas pontes consultadas da Casa Eiffel em Portugal só foram utilizadas treliças de rótula simples (Cruz de Santo André) ou de rótula dupla.

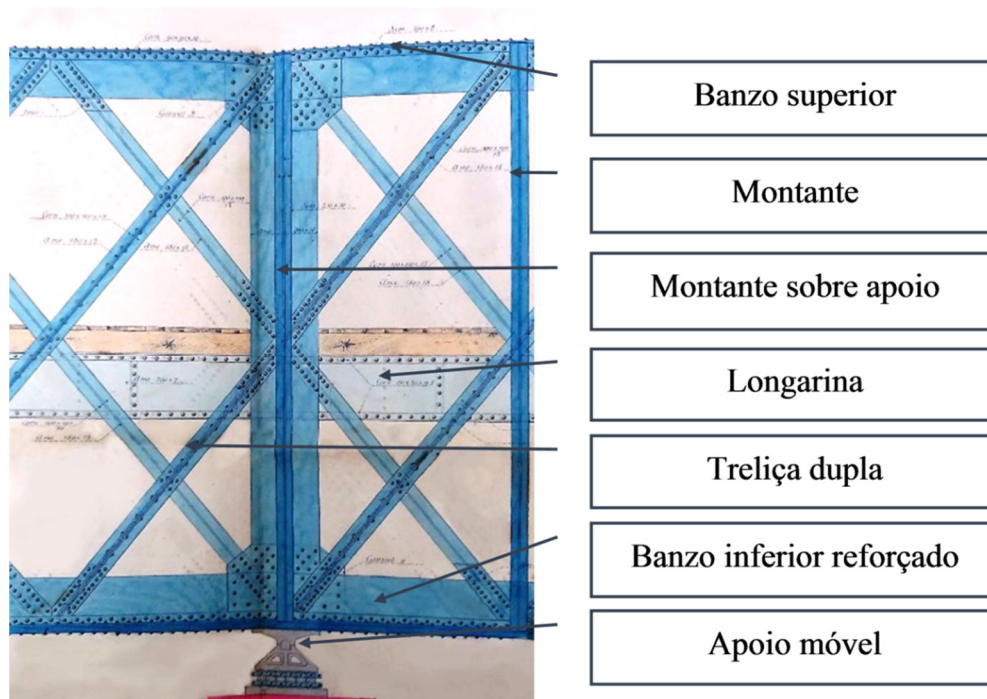


Figura 4.19 - Identificação dos elementos constituintes de uma viga principal, adaptado de [64]

As vigas principais eram consideradas contínuas, sendo dimensionadas de modo a que a sua secção suportasse os momentos atuantes provocados pelo peso próprio dos tabuleiros e por uma sobrecarga uniforme regulamentada, com divisão da soma do valor encontrado pelas duas vigas principais constituintes da ponte.

Segundo os cálculos justificativos dos projetos, o valor da sobrecarga era definido por uma “Circulaire du ministère française” [75], sendo o valor mais utilizado de 4000 kg/m (40 kN/m) para as pontes de via simples. Na Figura 4.20 observa-se que esse valor de sobrecarga uniforme, estipulado na circular francesa, era definido para tramos com dimensões de 45 m, mas apesar disso este valor adotado nos projetos para tramos de dimensão inferior.

A dimensão utilizada para a aplicação da tabela, era a dos tramos intermédios. Apesar de a circular ter a data de 9 de julho de 1877, a Casa Eiffel usou essas recomendações mesmo

antes da sua publicação, pois o valor de sobrecarga referido já tinha sido adotado no projeto da Ponte de Barcelos.

PORTÉE des travées.	SUR- CHARGE uniforme.	PORTÉE des travées.	SUR- CHARGE uniforme.	PORTÉE des travées.	SUR- CHARGE uniforme.	PORTÉE des travées.	SUR- CHARGE uniforme.
mètres.	kilogrammes.	mètres.	kilogrammes.	mètres.	kilogrammes.	mètres.	kilogrammes.
2	12,000	11	6,900	20	4,900	70	3,500
3	10,500	12	6,500	25	4,500	80	3,400
4	10,200	13	6,200	30	4,300	90	3,300
5	9,800	14	5,900	35	4,200	100	3,200
6	9,500	15	5,700	40	4,100	125	3,100
7	8,900	16	5,500	45	4,000	150	3,000
8	8,300	17	5,400	50	3,900	et au delà	3,000
9	7,800	18	5,200	55	3,800		
10	7,300	19	5,100	60	3,700		

Figura 4.20 - Valores de sobrecarga de acordo com Circulaire du ministère des travaux publics aux préfets [75]

O cálculo dos momentos atuantes devido às cargas e sobrecargas era feito pelo método simplificado, em caso de uma ponte com um único tramo, e nos restantes casos pela teoria de Clapeyrone, em que era utilizada a alternância de cargas (sobrecarga), que era disposta nas várias hipóteses de carregamento conforme o número de tramos, considerando-se a hipótese mais restritiva. A Figura 4.21 demonstra as várias hipóteses equacionadas, cujo exemplo foi retirado do projeto comum à Ponte de Trezoi e à Ponte do Milijoso.

Como caso único nas memórias descritivas analisadas, no projeto da Ponte do Tâmega [76] utilizou-se, para o cálculo dos momentos atuantes, o método de Mr. Bresse, que o autor desenvolveu no 3º volume do seu trabalho de mecânica aplicada.

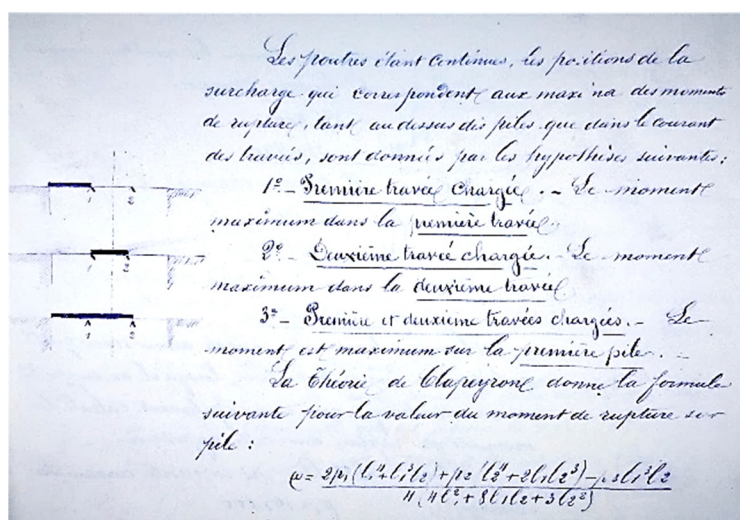


Figura 4.21 - Método de alternância de posições da sobrecarga [77]

No dimensionamento das vigas principais era definida uma secção base, com a configuração demonstrada na Figura 4.9. O momento resistente era calculado através da expressão da Figura 4.22, em que “R” representa o coeficiente de trabalho máximo do ferro pudelado, que era 6 kg/mm<sup>2</sup>, o “I”, a inércia da secção considerada, e o “V” a distância da fibra mais distante à fibra neutra. Nos pontos em que o momento resistente fosse insuficiente, ou seja, inferior ao momento atuante de cálculo, este era incrementado adicionando chapas suplementares aos banzos e assim aumentando a sua espessura, permitindo assim o aumento da inércia e consequentemente do momento resistente.

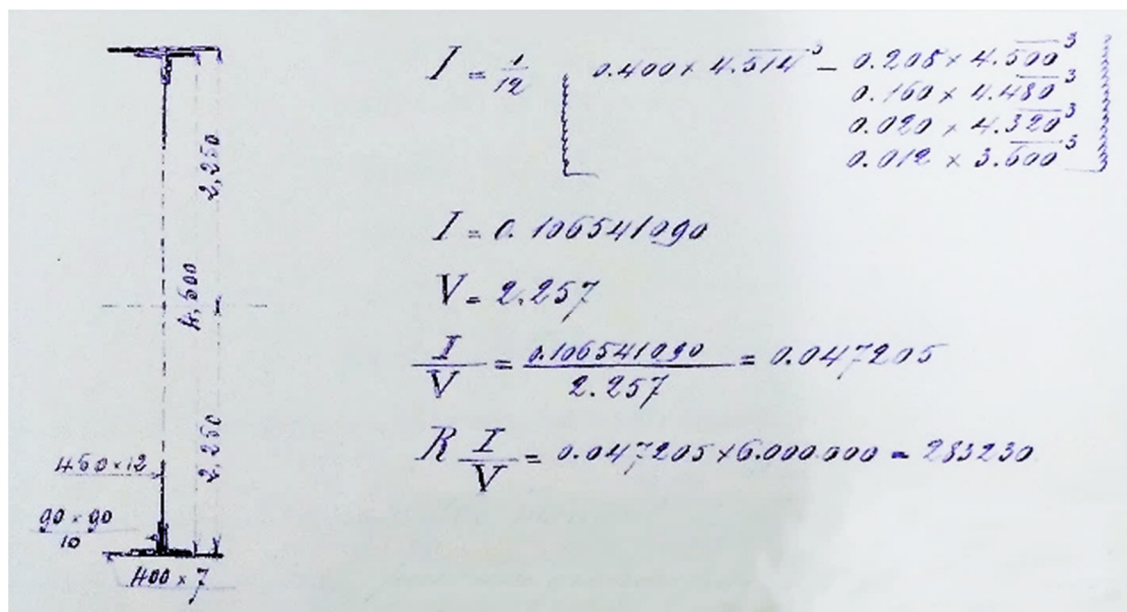


Figura 4.22 - Cálculo do momento resistente [78]

Como já referido, a espessura de chapas a acrescentar era calculada diretamente através da divisão entre os momentos atuante e resistente, obtendo-se o défice de espessura do banzo em mm.

#### 4.4.2. Treliças

As treliças são elementos rígidos, rebitados à parte superior e inferior da viga (banzos); as diagonais que se cruzam também são cravadas entre si.

As barras das treliças formam os paramentos verticais das vigas, e são calculadas de modo a poder resistir por si só aos esforços transversos, que se desenvolvem nas vigas devido



ao efeito das cargas e sobrecargas impostas. Estes elementos eram dimensionados de modo a que não fosse ultrapassado o coeficiente de trabalho máximo permitido para o ferro pudelado.

No dimensionamento das treliças, para o cálculo da sua resistência ao esforço transversal, era retirada dos cálculos a secção dos furos realizados nas barras que funcionavam à tração. Já nas barras com funcionamento à compressão, as perdas de secção não eram consideradas. Pode-se observar na Figura 4.23, na coluna 7 “*Section nette*”, aparece o valor corrigido da coluna 6 “*Section brute*” devido aos furos realizados nas referidas peças que funcionavam à tração; já na coluna 10 “*Section brute*”, que pertence às barras comprimidas, o valor não é corrigido.

Nº	Effort total	Effort p. barre	Section à 6 K°	Barres tendues	Section brute	Section nette	R	Barres comprimées	Section brute	R
1	87250	43625	7271	Semelle 310x10 Ame 150x7 Cornières 100x100x10	7353	7353	5.92	Semelle 300x7 Ame 150x11 Cornières 80x80x9.5	7315	5.95
2	71000	37000	6166	Semelle 240x10 Ame 120x7 Cornières 80x80x10	6110	6226	5.95	Semelle 270x7 Ame 170x11 Cornières 70x70x9.5	6235	5.94
3	60750	30375	5062	Semelle 270x8 Ame 120x7 Cornières 70x70x10	5070	5070	5.96	Semelle 260x7 Ame 140x7 Cornières 70x70x8	5142	5.92
4	47500	23750	3958	Cornières 100x100x12	11512	39811	5.75	Ame 150x7 Cornières 80x80x10	4310	5.52
5	34250	17125	2854	Cornières 80x80x10	3100	2960	5.78	Ame 120x7 Cornières 80x80x9.5	3095	11.00
6	21000	10500	1780	Cornières 70x70x9	2358	1962	5.35	Ame 110x7 Cornières 70x70x9	3185	3.37

Figura 4.23 - Verificação das barras das treliças ao esforço transversal

#### 4.4.3. Montantes

Os montantes verticais, sobre os encontros e sobre os pilares, eram alvo de dimensionamento com vista a garantir o esforço transversal máximo que ocorre nesses pontos, existindo uma configuração tanto para os apoios sobre os encontros como sobre os pilares.

Na Figura 4.24 observa-se a configuração e respetivos cálculos de uma secção de um montante, utilizado sobre os apoios dos pilares no projeto comum das Pontes do Trezoi e da Ponte do Milijoso [77]. No mesmo projeto, foram igualmente dimensionados os montantes sobre os apoios situados nos encontros.

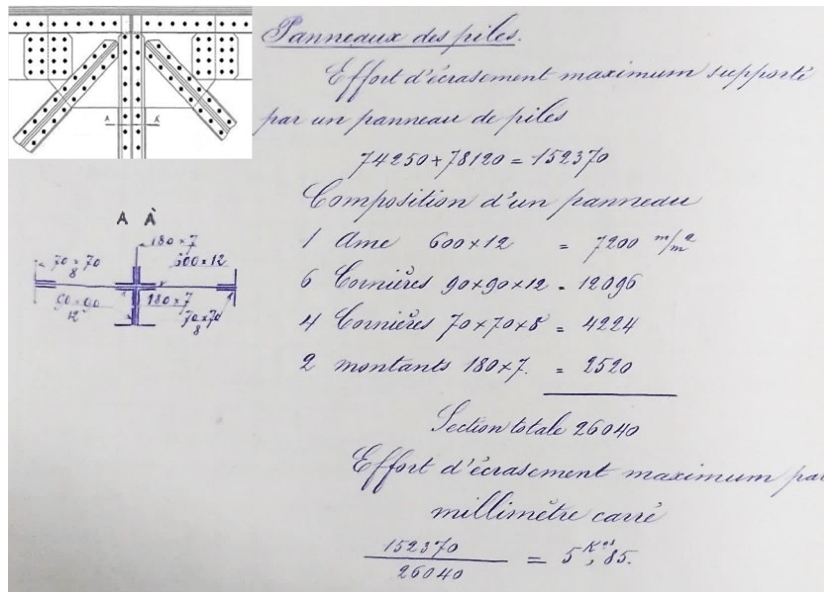


Figura 4.24 - Cálculo da compressão máxima suportada por um montante

#### 4.4.4. Longarinas

O dimensionamento das longarinas era feito de modo a que estas pudessem resistir aos momentos atuantes provocados pelo peso próprio e por uma sobrecarga definida pela locomotiva que iria efetuar esse trajeto, colocando um eixo ou mais da locomotiva na posição mais desfavorável entre duas carlingas, obtendo-se assim o momento máximo e assim confirmar se respeitava o coeficiente de trabalho.

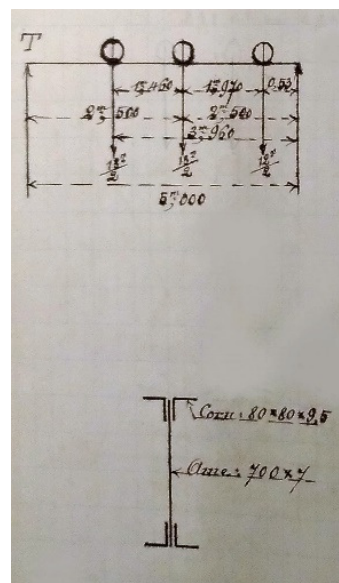


Figura 4.25 - Modelo utilizado para o dimensionamento das longarinas na Ponte da Praia [64]

#### 4.4.5. Carlingas

As carlingas, também eram alvo de dimensionamento, para assegurar que o coeficiente de trabalho não era ultrapassado. Para tal eram contabilizados o peso próprio, a reação das longarinas e a carga associada à locomotiva que iria efetuar esse trajeto. O modelo de cálculo usado definia-se de modo a que a sua posição fosse a mais desfavorável para a carlinga a dimensionar. Na Figura 4.26 observam-se as carlingas utilizadas na Ponte da Praia [64].

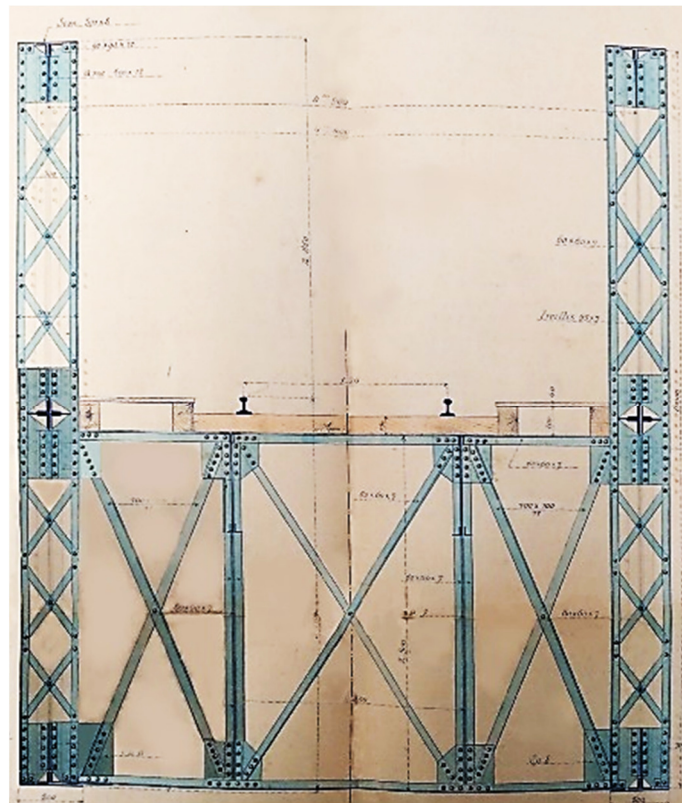


Figura 4.26 - Corte do tabuleiro da Ponte da Praia [64]

#### 4.4.6. Série de preços

A título de curiosidade dá-se a observar a série preços utilizada na construção das várias pontes na Linha da Beira Alta. Num anexo ao contrato entre a “*Société Financière de Paris*” e G. Eiffel et C<sup>ie</sup>, na data de 5 de julho 1879, para a execução dos encontros das pontes, pilares e das bases dos pilares metálicos de oito pontes metálicas, nomeadamente Várzeas, Milijoso, Trezói, Breda, Mortagoa, Rio Criz, Rio Dão e Rio Coa [79].

Pode-se observar na Figura 4.27, na série de preços apresentada a concurso para os materiais utilizados na construção das pontes da Linha da Beira Alta. A cal gorda (“*Chaux grasse*”), a alvenaria não trabalhada (“*Moellons bruts*”), a alvenaria de pedra aparelhada

(“Moellons piqués”), a cantaria (“*Pierre de taille*”), a areia para argamassa (“*Sable pour mortier*”) e o agregado britado (“*Pierre cassée*”) com o metro cúbico como unidade de medida. Quanto ao Cimento (“*Ciment*”), a unidade de medida é a “La tome”, uma medida de volume usada na altura. De salientar que na serie de preços, a moeda usada era o franco francês, onde o material mais oneroso era o cimento com o preço de 100 francos “La tome” seguido da cantaria, sendo o material mais económico o agregado britado [79].

Pode-se também observar os valores do material metálico no contrato e caderno de encargos da Ponte de Barcelos, em que a tonelada de ferro tinha o preço de 240 francos e o ferro fundido tinha o preço de 180 francos por tonelada [19].

Approvisionnement.

N° de la serie	Désignation des Matériaux.	Unité de compte.	Prix	Observations.	N° de la serie	Désignation des Matériaux.	Unité de compte.	Prix	Observations.
1	Chaux grasse approvisionnée à pied d'œuvre	Le mètre cube	quarante francs	60'	2	Pierre cassée approvisionnée à pied d'œuvre	Le mètre cube	Deux francs	2'
3	Moellons bruts approvisionnés à pied d'œuvre	Le mètre cube	Cinq francs	5'					
3	Moellons piqués approvisionnés à pied d'œuvre	Le mètre cube	trente francs	30'					
4	Pierre de taille approvisionnée à pied d'œuvre	Le mètre cube	Soixante francs	60'					
5	Sable pour mortier approvisionné à pied d'œuvre	Le mètre cube	Cinq francs	5'					
6	Ciment approvis- onné à pied- d'œuvre	La tome	Cent francs	100'					

Pressé pour être annexé au contrat en  
date du 8 Juillet 1879  
Les Administrateurs délégués  
*C. Eiffel* *Durand* *de Nevers*

Figura 4.27 - Reprodução da série de preços das pontes da Linha da Beira Alta [79]

## 4.5. Receção da obra - ensaios de carga das pontes

Após a construção de uma ponte, estavam previstos ensaios de modo a assegurar a segurança da mesma. De seguida, descrevem-se os ensaios exigidos antes da abertura ao serviço das pontes. Estes ensaios eram estáticos e dinâmicos e estavam estipulados no regulamento aprovado por decreto de 24 de fevereiro de 1863, os quais são descritos de seguida com foco nas pontes metálicas com uma só via.



### **4.5.1. Prova estática – carga de um peso morto**

Para vãos com mais de 20 m, cada metro de via era carregado com um peso adicional de 3500 kg. O ensaio só terminava quando a flexão imposta não tivesse qualquer evolução durante uma hora; já nos vãos com 20 metros ou menos a carga distribuída seria de 4000 kg por metro [80] [19].

### **4.5.2. Prova dinâmica – passagem de um peso rolante**

As provas dinâmicas eram executadas por duas locomotivas, as quais seriam as mais pesadas utilizadas na exploração, com os respectivos vagões carregados na sua máxima carga a uma velocidade de 20 km/h. Era igualmente feita a passagem de um comboio expresso à velocidade de 60 km/h ou superior; os vagões de mercadorias neste caso eram carregados com o peso correspondente aos vagões de passageiros cheios de utentes [80] [19].

## **4.6. Considerações finais**

Neste capítulo são apresentados vários aspetos das pontes metálicas da Casa Eiffel desde os materiais, as soluções construtivas, os cálculos de dimensionamento, até recomendações para colocação em obra e controlo da qualidade.

Em particular, são descritos os processos construtivos inovadores nas obras, como a realização de fundações por caixão de ar comprimido, a ancoragem dos pilares metálicos às fundações e a construção do tabuleiro por lançamento.

Posteriormente, são referidos os principais materiais utilizados em todas as fases da obra, com as suas características e cuidados na colocação. Dada a baixa qualidade do ferro pudelado, comparativamente com os aços de hoje em dia, havia um cuidado com a colocação em obra e substituição de peças defeituosas.

Relativamente ao dimensionamento, são descritos os métodos de cálculo e os pressupostos subjacentes para os elementos principais das pontes. Para as vigas era definida, no início, uma secção base, sendo utilizada nos cálculos uma sobrecarga de 4000 kg, valor especificado na “*Circulaire du Ministère Française*”. Essa secção base era reforçada com chapas adicionais nas secções onde necessário, no seguimento dos cálculos de dimensionamento.

No cálculo dos momentos atuantes devidos às cargas e sobrecargas, em pontes com três ou mais tramos, era utilizada a teoria de Clapeyrone, para alternância de cargas por forma a encontrar a configuração mais desfavorável.

Chegou-se à conclusão que o dimensionamento das treliças era feito de modo a resistir aos esforços transversos. Dos projetos analisados pode observar-se que foram utilizados dois tipos de treliça: a de rótula simples em Cruz Santo André e a de rótula dupla. O dimensionamento das carlingas e longarinas era feito através de modelos que tinham em consideração o peso e a configuração específica da locomotiva que iria circular naquela ponte.

Finalmente, na receção das obras eram feitos ensaios de carga estáticos e dinâmicos, de acordo com o especificado num regulamento aprovado por Decreto.

# **Reconhecimento de Padrões Estruturais**

## **5.1. Considerações iniciais**

Neste capítulo é feito um reconhecimento de padrões estruturais, nomeadamente de características físicas e estruturais, bem como uma análise paramétrica sobre alguns dos dados retirados de projetos das pontes, com o objetivo de identificar similaridades estruturais nas pontes projetadas pela Casa Eiffel em Portugal.

Note-se que, nos resultados da análise realizada é adotada a denominação genérica de “pontes”, tanto para as pontes como para os viadutos, como já referido no Capítulo 3.

## **5.2. Identificação das características físicas e estruturais**

Por forma a identificar padrões nas pontes e viadutos, construídos pela Casa Eiffel em Portugal, foram analisadas todas as 27 pontes com comprimento superior a 20 m, comprovadas, com base nas fontes bibliográficas analisadas, como sendo da autoria da Casa Eiffel. A função, as datas de inauguração e o estado atual dessas pontes são apresentadas na Tabela 5.1.

As características físicas e estruturais das pontes analisadas neste trabalho são resumidas na Tabela 5.2, nomeadamente, extensão total, solução estrutural, dimensão do tramo intermédio, tipo de pilares, posição do tabuleiro e tipo de treliças.

Da documentação analisada e resumida na Tabela 5.1 e na Tabela 5.2, é possível caracterizar a obra da Casa Eiffel em Portugal em números, tal como se apresentam de seguida.

Tabela 5.1 - Função, data da inauguração e estado atual das pontes da Casa Eiffel

<b>Id</b>	<b>Nome</b>	<b>Função</b>	<b>Data de inauguração</b>	<b>Estado atual</b>
1	Ponte de Barcelos	Ferroviária	21-10-1877	Substituída
2	Ponte de Viana do Castelo	Rodoferroviária	30-06-1878	Em serviço
3	Ponte do Neiva	Ferroviária	24-02-1878	Substituída
4	Ponte do Âncora	Ferroviária	01-07-1878	Substituída
5	Ponte Maria Pia	Ferroviária	04-11-1877	Desativada em 1991
6	Ponte de Sacavém	Ferroviária	08-04-1893	Substituída
7	Ponte da Asseca	Ferroviária	08-04-1893	Substituída
8	Ponte Monte Trigo	Ferroviária	08-04-1893	Substituída
9	Ponte do Alviela	Ferroviária	08-04-1893	Em serviço
10	Ponte do Almonda	Ferroviária	08-04-1893	Substituída
11	Viaduto Vila Meã	Ferroviária	15-09-1878	Substituída
12	Ponte do Tâmega	Ferroviária	15-09-1878	Substituída
13	Ponte das Várzeas	Ferroviária	1882	Substituída
14	Viaduto do Milijoso	Ferroviária	1882	Substituída
15	Viaduto do Trezói	Ferroviária	1882	Substituída
16	Ponte da Breda	Ferroviária	1882	Substituída
17	Ponte do Criz	Ferroviária	1882	Substituída
18	Ponte do Dão	Ferroviária	1882	Substituída
19	Ponte de Olas	Ferroviária	1882	Substituída
20	Ponte Noémi	Ferroviária	1882	Substituída
21	Ponte do Côa	Ferroviária	1882	Substituída
22	Ponte da Praia	Ferroviária adaptada a rodoviária	1889	Em serviço
23	Ponte de Niza	Ferroviária	06-06-1880	Substituída
24	Ponte de Castelo de Vide	Ferroviária	06-06-1880	Substituída
25	Viaduto da Ponte Nova	Ferroviária	02-04-1887	Substituída
26	Ponte de Sant'Anna de baixo	Ferroviária	02-04-1887	Substituída
27	Ponte de Sant'Anna de cima	Ferroviária	02-04-1887	Substituída



O Eng.º Gustave Eiffel desenvolveu a sua atividade em Portugal durante o século XIX, nas décadas de 70, 80 e 90. Assim, constata-se que 56% do total da sua obra em Portugal foi realizada na década de 80, seguindo-se a década de 70 com 26% e por fim a década de 90 com 19%.

As pontes que a Casa Eiffel realizou em Portugal foram, na sua totalidade, pontes metálicas. Entre essas, 96% foram para uso exclusivo ferroviário, sendo a Ponte de Viana do Castelo a única que tinha, além do uso ferroviário, o uso rodoviário e pedonal. Das pontes projetadas e executadas em Portugal, 78% atravessavam rios ou ribeiros.

Contudo, observa-se que 85% das pontes construídas pela Casa Eiffel já foram substituídas por outras e apenas três pontes, que representa cerca de 11%, ainda se encontram ao serviço, nomeadamente a Ponte da Praia que foi reafectada à rodovia, a Ponte de Viana do Castelo na Linha do Minho e, por último, a Ponte do Alviela, na Linha do Norte. A Ponte Maria Pia é a única que se encontra desativada, existindo, porém, projetos para o seu reaproveitamento, como travessia pedestre e de ciclovias, a unir as margens do rio Douro entre Vila Nova de Gaia e Porto.

Ao nível da extensão as pontes foram bastantes diversificadas, tendo 64% das mesmas mais de 100 m, 32% mais de 200 m e 12% mais de 300 m.

De ponto de vista das soluções construtivas, 96% das pontes eram constituídas por vigas metálicas contínuas em treliça, sendo a única exceção a Ponte Maria Pia; 73% destas utilizava treliças de rótula simples (Cruz de Santo André) e as restantes, cerca de 27%, utilizavam treliça de rótula dupla.

Relativamente aos pilares, 55% eram metálicos e 45% de alvenaria. Em relação ao número de pilares por ponte, 62% das pontes tinham menos de quatro pilares e os restantes 38% tinham quatro ou mais pilares.

A Casa Eiffel utilizou as três posições possíveis para a localização dos tabuleiros das pontes relativamente às vigas contínuas, nomeadamente: 54% dos tabuleiros localizavam-se na parte superior, 38% dos tabuleiros na posição intermédia e 8% dos tabuleiros na parte inferior das vigas contínuas.

Os tramos intermédios das suas pontes eram sempre de dimensões superiores aos laterais quando estes existiam, sendo que 65% tinham mais de 40 m, 35% eram maiores ou iguais a 50 m e 17% tinham 60 m ou mais. A Ponte do Dão apresenta o maior tramo projetado por Gustave Eiffel, com 75 m.

Tabela 5.2 - Identificação de características estruturais e tipos de treliça

<b>Id</b>	<b>Nome</b>	<b>Extensão total (m)</b>	<b>Solução estrutural</b>	<b>Tramos intermédios (m)</b>	<b>Pilares</b>	<b>Posição do tabuleiro</b>	<b>Tipo de treliça</b>
1	Ponte de Barcelos	132,0	VMCR	48,6	PCFF	Superior	Rótula dupla
2	Ponte de Viana do Castelo	561,5	VMCR	58,47	PCA	Duplo tabuleiro, rodoviário e ferroviário	Rótula dupla
3	Ponte do Neiva	29,5	VMCR	29,5	Sem pilares	Superior	Cruz de Santo André
4	Ponte do Âncora	32,0	VMCR	32	Sem pilares	Inferior	Cruz de Santo André
5	Ponte Maria Pia	352,4	Arco metálico semicircular de rótula	-	Arco metálico e PMTC	Superior	Cruz de Santo André, sendo no tabuleiro central de alma cheia
6	Ponte de Sacavém	-	VMCR	-	Sem pilares	Superior	Cruz de Santo André
7	Ponte da Asseca	114,3	VMCR	59,3	PCA	Intermédio	Rótula dupla
8	Ponte Monte Trigo	31,7	VMCR	-	Sem pilares	Superior	-
9	Ponte do Alviela	60,6	VMCR	-	Sem pilares	Inferior	Cruz de Santo André
10	Ponte do Almonda	30,9	VMCR	-	Sem pilares	Intermédio	Cruz de Santo André
11	Viaduto Vila Meã	221,9	VMCR	50	PCA	Superior	Rótula dupla
12	Ponte do Tâmega	258,7	VMCR	56	PMTC	Superior	Rótula dupla
13	Ponte das Várzeas	280,5	VMCR	42	PMTC	Intermédio	Cruz de Santo André
14	Viaduto do Milijoso	126,5	VMCR	49	PMTC	Intermédio	Cruz de Santo André
15	Viaduto do Trezói	126,5	VMCR	49	PMTC	Intermédio	Cruz de Santo André
16	Ponte da Breda	126,5	VMCR	49	PMTC	Intermédio	Cruz de Santo André
17	Ponte do Criz	207,0	VMCR	45,5	PMTC	Intermédio	Cruz de Santo André
18	Ponte do Dão	188,0	VMCR	75	PMTC	Inferior	Rótula dupla
19	Ponte de Olas	21,0	VMCR	-	Sem pilares	-	-
20	Ponte Noémi	43,0	VMCR	-	PCA	Inferior	Cruz de Santo André

<b>Id</b>	<b>Nome</b>	<b>Extensão total (m)</b>	<b>Solução estrutural</b>	<b>Tramos intermédios (m)</b>	<b>Pilares</b>	<b>Posição do tabuleiro</b>	<b>Tipo de treliça</b>
21	Ponte do Côa	207,0	VMCR	45,5	PMTC	Intermédio	Cruz de Santo André
22	Ponte da Praia	496,5	VMCR	62,5	PCA	Intermédio	Rótula dupla
23	Ponte de Niza	75,8	VMCR	28,2	PMTC	Superior	Cruz de Santo André
24	Ponte de Castelo de Vide	106,0	VMCR	-	PMTC	Superior	Cruz de Santo André
25	Viaduto da Ponte Nova	40,0	VMCR	20,5	PCA	Superior	Cruz de Santo André
26	Ponte de Sant'Anna de baixo	150,0	VMCR	30,0	PCA	Superior	Cruz de Santo André
27	Ponte de Sant'Anna de cima	50,4	VMCR	25,2	PCA	Superior	Cruz de Santo André

Legenda:

PCA - pilares de alvenaria

PCFF - pilares de colunas de ferro fundido preenchidos por betão, contraventados por cruces de Santo André

PMTC - pilares metálicos formato tronco-piramidal

VMCR - vigas metálicas contínuas rotuladas

### 5.3. Utilização de tipos de treliça

Em função da opção sistematizada da Casa Eiffel pela utilização da treliça em Cruz de Santo André e da treliça de rótula dupla, começou-se por procurar um padrão estrutural que justificasse as opções.

A Tabela 5.2 resume, entre outras características, o tipo de treliça utilizado. Após a observação da dimensão dos tramos intermédios, conclui-se que, quando estes tomavam valores acima de 50 m, a opção recaía pelas treliças de rótula dupla; ao invés, abaixo deste valor, a opção seria a utilização de treliças tipo Cruz de Santo André.

Há, contudo, nesta fronteira dos 50 m de extensão de um tramo intermédio, um caso único, a Ponte de Barcelos, em que embora o tramo tenha uma dimensão de 48,6 m a opção escolhida foi pela treliça de rótula dupla. Isto poderá ser devido ao facto de esta ser uma das primeiras pontes que a Casa Eiffel projetou em Portugal e, consequentemente, ser ainda inexistente a falta de sistematização sobre o tipo de treliças a utilizar. Também é de relevar que é a única ponte que utiliza pilares de colunas de ferro fundido preenchidas por betão.

Para esta análise não foi considerada a Ponte Maria Pia, pois com a adoção do seu arco metálico como solução estrutural, não se reconheceu ser comparável com as restantes pontes.

## 5.4. Parâmetros dimensionais

O emprego de parâmetros dimensionais teve como objetivo a criação de uma análise mais profunda, de modo a que fosse possível encontrar tendências estruturais ocultas.

### 5.4.1. Parâmetro $\alpha$

Com a adoção do parâmetro  $\alpha$ , calculado através da equação ( 5.1 ), pretende-se observar a existência de um padrão na relação entre tramos extremos e tramos intermédios, onde  $L_1$  é a extensão do tramo extremo e  $L_2$  a extensão do tramo intermédio (central).

$$\alpha = \frac{L_1}{L_2} \quad ( 5.1 )$$

Nesta análise foram consideradas apenas as pontes com três ou mais tramos e com informações geométricas conhecidas. A Tabela 5.3 e a Figura 5.1 resumem os valores do parâmetro  $\alpha$ . Note-se que apenas foram analisadas 15 das 27 pontes identificadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.3 - Parâmetro  $\alpha$

Id	Nome	Tramos extremos ( $L_1$ )	Tramos intermédios ( $L_2$ )	Razão ( $\alpha$ )
1	Ponte de Barcelos	40,80	48,60	0,84
2	Ponte de Viana do Castelo	47,00	58,47	0,80
7	Ponte da Asseca	54,40	59,30	0,92
11	Viaduto Vila Meã	40,00	50,00	0,80
12	Ponte do Tâmega	44,80	56,00	0,80
13	Ponte das Várzeas	35,00	42,00	0,83
14	Viaduto Milijoso	38,50	49,00	0,79
15	Viaduto Trezói	38,50	49,00	0,79
16	Ponte da Breda	38,51	49,00	0,79
17	Ponte do Criz	35,00	45,50	0,77
18	Ponte do Dão	56,25	75,00	0,75
21	Ponte do Côa	35,00	45,50	0,77
22	Ponte da Praia	4,05	62,50	0,72
23	Ponte de Niza	23,80	28,20	0,84
26	Ponte Sant'Ana de baixo	27,50	30,00	0,92



Figura 5.1 - Dispersão do parâmetro de  $\alpha$

Após a análise dos valores obtidos, pode-se afirmar que o coeficiente  $\alpha$  tem uma variação de valores bastante homogênea, não ultrapassando uma banda de valores entre o mínimo de 0,72 (na Ponte da Praia) e o máximo de 0,92 (nas pontes da Asseca e Sant’Ana de baixo). Em termos percentuais, em 86,7% dos casos analisados, o  $\alpha$  é igual ou menor que 0,84, tendo um valor médio de 0,81. Das pontes analisadas, em 66,7% dos casos, o parâmetro  $\alpha$  está abaixo do valor médio.

#### 5.4.2. Parâmetro $\lambda_t$

O parâmetro  $\lambda_t$ , calculado através da equação ( 5.2 ), representa o coeficiente de esbelteza, em que  $L_2$  representa a extensão do tramo intermédio e  $h_v$  representa a altura da viga principal. Em algumas pontes não foi possível encontrar o parâmetro  $\lambda_t$ , pois não eram conhecidos os valores necessários ao seu cálculo. Assim, apenas foram analisadas 16 pontes da Tabela 5.2, tal como resumido na Tabela 5.4.

$$\lambda_t = \frac{L_2}{h_v} \quad (5.2)$$

Tabela 5.4 - Parametro  $\lambda_t$ 

Id	Nome	Altura da viga, $h_v$ (m)	Extensão, $L_2$ (m)	$\lambda_t$
1	Ponte de Barcelos	5,2	48,60	9
2	Ponte de Viana do Castelo	7,5	58,47	8
3	Ponte do Neiva	3,0	29,50	10
4	Ponte do Âncora	3,5	32,00	9
7	Ponte da Asseca	6,0	59,30	10
12	Ponte do Tâmega	5,6	56,00	10
13	Ponte das Várzeas	4,5	42,00	9
14	Viaduto Milijoso	4,5	49,00	11
15	Viaduto Trezói	4,5	49,00	11
17	Ponte do Criz	4,5	45,50	10
18	Ponte do Dão	7,5	75,00	10
21	Ponte do Côa	4,5	45,50	10
22	Ponte da Praia	6,0	62,50	10
25	Viaduto da Ponte Nova	2,0	20,50	10
26	Ponte de Sant' Anna de baixo	3,0	30,00	10
27	Ponte de Sant' Anna de cima	3,0	25,20	8

Com base nos valores obtidos, pode-se inferir que existe um padrão bem definido e consistente em todas as pontes analisadas, pois os valores do coeficiente de esbelteza ( $\lambda_t$ ) variam entre 8 e 10.

### 5.4.3. Parâmetro $\beta$

O parâmetro  $\beta$  representa a relação entre os momentos atuantes máximos com o mesmo sinal, obtidos nos tramos extremos e nos tramos intermédios da mesma ponte. Assim, o  $\beta_1$  foi calculado usando a equação ( 5.3 ) para os momentos negativos, e o  $\beta_2$  calculado através da equação ( 5.4 ) para os momentos positivos, em que  $M_1$  apresenta os momentos desenvolvidos no tramo extremo e  $M_2$  os momentos nos tramos intermédios.

$$\beta_1 = \frac{M_1^-}{M_2^-} \quad ( 5.3 )$$

$$\beta_2 = \frac{M_1^+}{M_2^+} \quad ( 5.4 )$$

### 5.4.3.1. Cálculo e análise dos momentos atuantes

Esta análise foi realizada considerando uma carga distribuída de 1 kN/m. Foram estudadas as pontes com três ou mais tramos e com dimensões conhecidas, sendo analisadas 13 das 27 pontes da Tabela 5.2.

Na Figura 5.2 apresentam-se, como exemplo, os resultados obtidos na Ponte de Barcelos, que tinha as vigas principais com treliças de rótula dupla e o tabuleiro desenvolvia-se na parte superior da viga. O momento máximo positivo calculado foi de 119,7 kN.m nos tramos extremos. Os momentos máximos negativos de -200,87 kN.m desenvolviam-se sobre os pilares. A Tabela 5.5 resume os resultados calculados para todas as 13 pontes, adicionalmente, a tabela apresenta os valores de  $\beta$ .

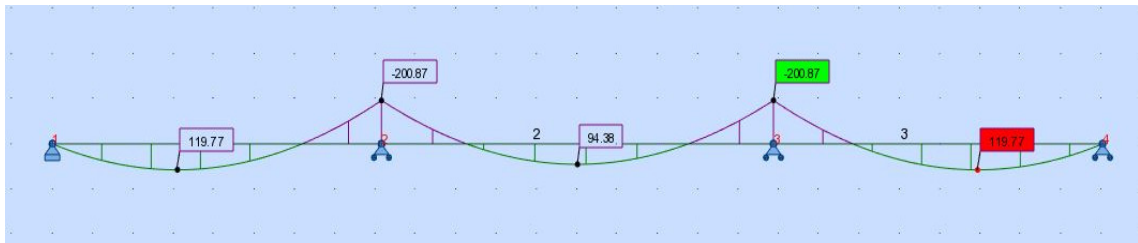


Figura 5.2 - Cálculo dos momento de uma carga distribuida de 1 kN/m na Ponte de Barcelos

Tabela 5.5 - Valores de  $\beta$  obtidos

Id	Nome	Nº Tramos	$M_1^-$ (kN.m)	$M_2^-$ (kN.m)	$M_1^+$ (kN.m)	$M_2^+$ (kN.m)	$\beta_1$	$\beta_2$
1	Ponte de Barcelos	3	200,87	200,87	119,77	94,38	<b>1,00*</b>	<b>1,27</b>
2	Ponte de Viana do Castelo	10	280,41	285,73	153,49	143,84	<b>0,98</b>	<b>1,07</b>
11	Viaduto Vila Meã	4	204,03	210,48	110,99	105,24	<b>0,97</b>	<b>1,05</b>
12	Ponte do Tâmega	5	256,41	262,32	139,05	132,63	<b>0,98</b>	<b>1,05</b>
13	Ponte das Várzeas	7	150,00	147,16	87,31	72,39	<b>1,02</b>	<b>1,21</b>
14	Viaduto do Milijoso	3	195,00	195,00	100,61	105,13	<b>1,00*</b>	<b>0,96</b>
15	Viaduto do Trezói	3	195,00	195,00	100,61	105,13	<b>1,00*</b>	<b>0,96</b>
16	Ponte da Breda	3	195,00	195,00	100,61	105,13	<b>1,00*</b>	<b>0,96</b>
17	Ponte do Criz	5	163,58	174,31	82,25	89,84	<b>0,94</b>	<b>0,92</b>
18	Ponte do Dão	3	445,44	445,44	207,39	257,68	<b>1,00*</b>	<b>0,80</b>
21	Ponte do Côa	5	163,58	174,31	82,25	89,84	<b>0,94</b>	<b>0,92</b>
23	Ponte de Niza	3	67,90	67,90	40,92	31,50	<b>1,00*</b>	<b>1,30</b>
26	Ponte de Sant'Anna de baixo	5	84,86	73,03	56,86	33,56	<b>1,16</b>	<b>1,69</b>

\* Valores não considerados na análise, por tomar no caso das pontes com três tramos sempre o valor de 1,00.

Analisando detalhadamente os resultados obtidos, pode-se observar que na Ponte do Dão, os valores dos momentos máximos são muito superiores aos alcançados nas restantes pontes alvo de estudo. Isto deve-se ao facto de esta ser a ponte com os tramos intermédios de maior extensão encontrados na obra da Casa Eiffel em Portugal, com cerca de 75 m.

Da análise das pontes com mais de três tramos observa-se que era privilegiada uma uniformização dos momentos atuantes, principalmente os negativos pois o coeficiente  $\beta_1$  toma valores muito próximos de 1,00. O coeficiente  $\beta_2$  apresenta valores mais díspares, tendo a Ponte de Sant'Anna de baixo um  $\beta_2$  igual a 1,69, sendo esse o caso com o valor mais elevado.

#### 5.4.3.2. Comparação de dois modelos com extensão dos tramos extremos diferentes

Com esta análise pretende-se confirmar que as dimensões dos tramos extremos eram propositadas, pois a sua extensão era a ideal para ser conseguida uma harmonização dos momentos negativos. Para atingir este objetivo fez-se uma simulação em que os tramos extremos tinham a mesma dimensão e comparou-se com o modelo original. Os dois modelos foram calculados com uma carga distribuída de 1 kN/m.

Na Figura 5.3, os momentos atuantes máximos positivos obtidos, com o modelo de tramos utilizado pela Casa Eiffel no Viaduto do Criz, foi 89,84 kN.m, já os momentos atuantes máximos negativos foi -174,31 kN.m.

A diferença entre momentos positivos de todos os vãos foi de 7,59 kN.m e a diferença dos momentos negativos sobre os pilares foi de 10,73 kN.m.

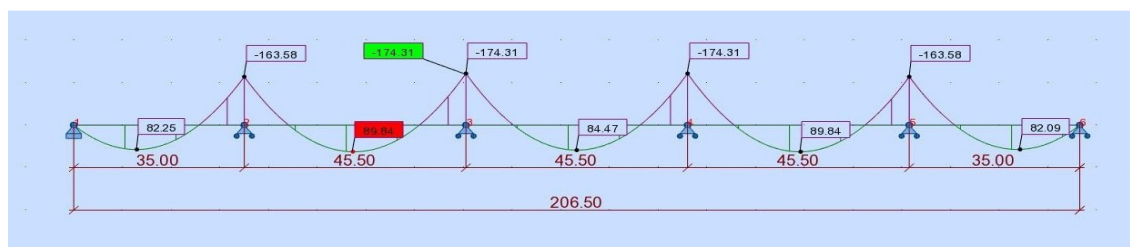


Figura 5.3 - Modelo da Casa Eiffel do Viaduto do Criz

Na Figura 5.4 demonstra-se os valores dos momentos atuantes obtidos num modelo em que os tramos tinham todos a mesma extensão vencendo o mesmo comprimento do modelo Eiffel. Os momentos positivos máximos obtidos tomaram o valor de 132,87 kN.m, os momentos máximos negativos situaram-se nos pilares extremos com o valor de -179,55 kN.m.



Neste modelo, as desigualdades entre momentos do mesmo sinal foram bastantes superiores ao modelo da Casa Eiffel, pois nos momentos positivos a diferença foi 76,37 kN.m e nos momentos negativos de 44,89 kN.m.

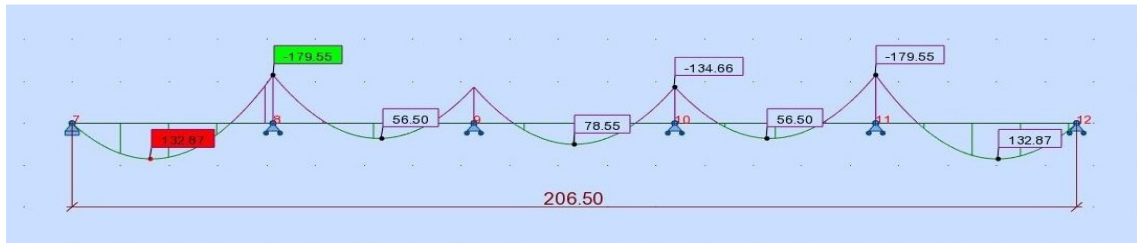


Figura 5.4 - Modelo com tramos iguais do Viaduto do Criz

Através dos resultados obtidos nas duas comparações, conclui-se que a Casa Eiffel privilegiava nos seus projetos, o equilíbrio entre os momentos de sinal igual de modo a obter uma estrutura equilibrada em termos de esforços. Para isso, utilizava a extensão dos tramos extremos para essa harmonização. Salienta-se também a simetria comum a todos os projetos, com exceção da Ponte da Praia, que tem um tramo extremo na margem sul do rio Tejo e Ponte da Asseca.

#### 5.4.3.3. Análise das soluções construtivas

Na Tabela 5.6 pretende-se averiguar se a opção por um sistema de treliças e a posição do tabuleiro utilizado eram influenciados pelos valores de momentos atuantes desenvolvidos na estrutura durante a sua utilização.

Analisando, na Tabela 5.6, os momentos máximos negativos nas estruturas para uma carga distribuída de 1 kN/m, conclui-se que, para valores situados acima de 200 kN.m, a Casa Eiffel utilizava a treliça de rótula dupla. Quanto à posição do tabuleiro, nessa gama de valores de momentos negativos, era utilizado o tabuleiro numa posição superior. A Ponte de Viana do Castelo não foi considerada devido a esta ser um caso especial, pois tem dois tabuleiros.

A Ponte do Dão foi a única com momentos superiores a 200 kN.m, cerca de 445 kN.m, onde a posição do tabuleiro foi na posição inferior.

Para valores de momentos entre 85 e 200 kN.m, a solução adotada para o tipo de treliça, foi a de Cruz de Santo André (rotula simples), em que o tabuleiro estava posicionado numa posição intermédia das vigas principais.

Para as pontes com momentos máximos mais baixos, entre 40 e 85 kN.m, a Casa Eiffel utilizava treliça de rótula simples com o tabuleiro numa posição superior da viga.

Tabela 5.6 - Comparação de momentos máximos e soluções construtivas adotadas

<b>Id</b>	<b>Nome</b>	<b>M<sup>+</sup>max (kN.m)</b>	<b>M<sup>-</sup>max (kN.m)</b>	<b>Treliça</b>	<b>Tabuleiro</b>
1	Ponte de Barcelos	119,77	200,87	Rótula dupla	Superior
2	Ponte de Viana do Castelo	153,49	285,73	Rótula dupla	Superior e inferior
11	Viaduto Vila Meã	110,99	210,48	Rótula dupla	Superior
12	Ponte do Tâmega	139,05	262,32	Rótula dupla	Superior
13	Ponte das Várzeas	87,31	150,00	Cruz de Santo André	Intermédio
14	Viaduto do Miljoso	105,13	195,00	Cruz de Santo André	Intermédio
15	Viaduto do Trezói	105,13	195,00	Cruz de Santo André	Intermédio
16	Ponte da Breda	105,13	195,00	Cruz de Santo André	Intermédio
17	Ponte do Criz	89,84	174,31	Cruz de Santo André	Intermédio
18	Ponte do Dão	257,68	445,44	Rótula dupla	Inferior
21	Ponte do Côa	89,84	174,31	Cruz de Santo André	Intermédio
23	Ponte de Niza	40,92	67,90	Cruz de Santo André	Superior
26	Ponte de Sant' Anna de baixo	56,86	84,86	Cruz de Santo André	Superior

## 5.5. Considerações finais

Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos na análise de algumas características estruturais das 27 pontes metálicas da Casa Eiffel, com comprimento superior a 20 m. Para além da identificação e do estudo das características físicas e estruturais, do padrão de treliças utilizadas, a análise foi também parametrizada em função de esforços estruturais (momentos atuantes), de forma a permitir um reconhecimento de padrões estruturais.

Das características das pontes construídas pela Casa Eiffel em Portugal foi possível constatar que as pontes são todas ferroviárias, exceto a Ponte de Viana do Castelo que é rodoferroviária. As extensões das pontes variam, tendo 64% mais de 100 m, 32% mais de 200

m e 12% mais de 300 m. A solução estrutural mais utilizada é de vigas metálicas contínuas em treliça, sendo a única exceção a Ponte Maria Pia com uma estrutura em arco.

Das treliças utilizadas nas vigas, 73% eram de rótula simples e as restantes de rótula dupla. De uma análise mais aprofundada das soluções estruturais resultou que, para tramos intermédios com comprimentos acima de 50 m, foi sempre utilizada a treliça de rotula dupla, exceto no caso da primeira ponte construída em Portugal, a Ponte de Barcelos, onde este tipo de treliça foi usado em tramos com menos de 50 m.

O parâmetro  $\alpha$  foi usado para avaliar o padrão na relação entre os tramos extremos e os intermédios. Observou-se alguma coerência nesta razão, em todas as obras estudadas, sendo a gama de variação obtida entre 0,72 e 0,92, onde cerca de 87% dos valores são inferiores a 0,84.

O parâmetro de esbelteza,  $\lambda_i$ , que avalia a razão entre o comprimento do ramo intermedio e a altura da viga principal, permitiu obter valores, relativamente constante em todas as 16 pontes analisadas, e onde existia a informação necessária, variando entre 8 e 11, sendo na maioria dos casos igual a 10.

Os parâmetros  $\beta_1$  e  $\beta_2$  foram definidos para avaliar a razão entre os momentos atuantes máximos dos tramos extremos e os momentos atuantes máximos dos tramos intermédios, para momentos negativos e positivos, respetivamente. Constatou-se a opção por uma compensação dos momentos negativos, tendo o  $\beta_1$  geralmente valores muito próximos da unidade.

Observou-se que a Casa Eiffel privilegiava, nos seus projetos, o equilíbrio entre os momentos de sinal igual de modo a obter uma estrutura equilibrada em termos de esforços. Para isso utilizava a extensão dos tramos laterais para essa harmonização. Salienta-se também a simetria, que é comum a todos os projetos com exceção da Ponte da Praia, que tem um tramo extremo na margem sul do rio Tejo, e da Ponte da Asseca.

Da análise dos momentos provocados por uma carga distribuída de 1 kN/m, para as diferentes soluções construtivas, constatou-se que para momentos negativos superiores a 200 kN.m, era sempre utilizada a treliça de rótula dupla e, na maioria dos casos, a posição do tabuleiro era na parte superior. Para valores de momentos entre 85 e 200 kN.m, a solução adotada era treliça em Cruz de Santo André (rotula simples), em que o tabuleiro era colocado numa posição intermédia das vigas principais. Para as pontes com momentos máximos mais baixos, entre 40 e 85 kN.m, Eiffel utilizava treliça de rótula simples com o tabuleiro numa posição superior da viga.



# Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

## 6.1. Sumário e conclusões

O trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação pretende contribuir para um melhor conhecimento da obra de engenharia deixada em Portugal pelo “Mágico do ferro” – Gustave Eiffel, através da Casa Eiffel. Para além de um melhor enquadramento histórico da sua formação e da sua obra, pretende-se essencialmente estudar os padrões estruturais das pontes metálicas construídas.

Um melhor conhecimento da obra do Gustave Eiffel permitirá no futuro, do ponto de vista científico, refletir sobre os primeiros anos de dimensionamento de pontes metálicas, a estimativa dos esforços nos materiais tendo em consideração os efeitos dinâmicos das cargas e, do ponto de vista patrimonial, permitirá conhecer melhor as pontes e a obra da Casa Eiffel que chegou aos nossos dias para, deste modo, ajudar a preservar o património cultural que elas representam para o nosso país.

Para poder atingir os objetivos deste trabalho, foi necessário estudar minuciosamente todos os documentos disponíveis da época, desde os projetos originais existentes no Arquivo da IP, que gentilmente foram postos ao dispor do autor para leitura e análise, às publicações em jornais e revistas, permitindo fazer um apanhado de todos os eventos e descrições das pontes metálicas, da construção e das inaugurações das principais linhas ferroviárias nacionais.

Assim, nesta dissertação, começa-se por fazer um enquadramento histórico social e político, no qual surgiram os primeiros caminhos de ferro em Portugal, apresentando-se as dificuldades inerentes à sua implantação, desde a oposição de personalidades da época, à bitola

adotada e à sua rentabilidade económica. Apesar dos altos e baixos da sua evolução, a rede ferroviária nacional tinha já uma extensão significativa em 1895. São também apresentadas as pontes ferroviárias em Portugal e a sua evolução histórica, em termos de material constituinte e solução estrutural, com destaque para as pontes metálicas.

Em seguida, faz-se uma breve descrição da vida e obra do Gustave Eiffel, apresentando a sua origem, o contexto histórico e social da sua formação e início da vida profissional, e os vários fatores que levaram a seguir o caminho até a construção da sua primeira ponte metálica e da constituição da Casa Eiffel. São referidos os seus principais mentores e o seu percurso profissional que lhe permitiu juntar diversas valências, como também o seu rigor científico e capacidade de gestão e organização. Refere-se também o período de permanência do Gustave Eiffel, na freguesia de Barcelinhos, concelho de Barcelos, Portugal, com a sua família, até a morte da sua esposa.

Para responder ao principal objetivo deste estudo, nomeadamente, em fazer um reconhecimento de padrões estruturais das pontes, da autoria de Gustave Eiffel em Portugal, foi preciso fazer um levantamento das principais características estruturais e identificar materiais, soluções construtivas e métodos de dimensionamento utilizados nos projetos da Casa Eiffel.

Com base na pesquisa bibliográfica e nos registos oficiais da IP, chegou-se à conclusão de que a Casa Eiffel deverá ter construído em Portugal 27 pontes com vão superior a 20 m, sendo todas apresentadas neste trabalho. É apresentada uma lista das referências bibliográficas por cada uma dessas pontes, tendo como fontes principais os projetos originais presentes no Arquivo Técnico da IP, as revistas da época “O Occidente”, a “Gazeta dos Caminhos de Ferro”, o “Boletim da C.P.” e outras publicações mais recentes.

A Casa Eiffel desenvolveu a sua atividade em Portugal durante o século XIX, nas décadas de 70, 80 e 90, onde cerca de 56% do total da sua obra em Portugal foi realizada na década de 80. As pontes construídas eram metálicas e de uso ferroviário, sendo a Ponte de Viana do Castelo a única que tinha, além do uso ferroviário, o uso rodoviário e pedonal. As pontes foram bastantes diversificadas ao nível da sua extensão, tendo 64% mais de 100 m, 32% mais de 200 m e 12% tinham mais de 300 m.

Das pontes construídas pela Casa Eiffel, 85% já foram substituídas por novas pontes, só três ainda se encontram ao serviço, nomeadamente a Ponte da Praia que foi reafectada à rodovia, a Ponte de Viana do Castelo na Linha do Minho, rodoferroviária e, por último, a Ponte do Alviela, na Linha do Norte. A Ponte Maria Pia é a única que se encontra desativada, existindo projetos para o seu reaproveitamento.

Apresentam-se, de seguida, com algum detalhe, o reconhecimento dos materiais, das soluções construtivas, dos métodos de dimensionamento e da receção de obra no caso das pontes metálicas realizadas pela Casa Eiffel em Portugal.

Dada a baixa qualidade do ferro pudelado, comparativamente aos aços atuais, existia uma preocupação para a monitorização e substituição de peças defeituosas.

Em termos de soluções construtivas de vários elementos constituintes das pontes, são referidas particularidades da construção dos elementos das pontes metálicas, como:

- A realização e aperfeiçoamento da técnica de fundações de pilares por caixões de ar comprimido;
- O sistema de ancoragem dos pilares metálicos às fundações;
- A posição dos tabuleiros variavam a sua posição de um modo geral dependente dos vãos, podendo estar situados na parte superior, intermédia e inferior nas vigas principais;
- A escolha do tipo de pilares conforme a sua localização, nomeadamente, pilares em alvenaria em contacto com água, e metálicos para pilares mais altos e esbeltos e o abandono da utilização de pilares tubulares, sendo que 55% eram metálicos e os restantes 45% em alvenaria;
- A garantia da drenagem interior dos encontros, quando vazados;
- A aplicação do sistema de construção dos tabuleiros por lançamento.

Relativamente aos métodos de dimensionamento, aos métodos de cálculo e aos pressupostos considerados no projeto, destaca-se:

- O coeficiente de trabalho (ou tensão admissível nos dias de hoje) para o ferro pudelado utilizado no dimensionamento, dos vários componentes integrantes de uma ponte metálica, era de  $6 \text{ kg/mm}^2$  (60 MPa);
- Nas vigas, era definida uma secção base que era reforçada com chapas adicionais em função dos momentos atuantes;
- A configuração mais desfavorável para o cálculo dos momentos atuantes era obtida através da alternância de cargas nos vários tabuleiros, em pontes com três ou mais tramos;
- As treliças eram dimensionadas de modo a resistir ao esforço transversal;
- As carlingas e longarinas eram dimensionadas tendo em consideração as locomotivas mais restritivas a utilizar em serviço.

Neste trabalho foram identificados os seguintes padrões estruturais nas pontes metálicas construídas pela Casa Eiffel em Portugal:

- O tipo de treliça utilizada nos projetos estudados era do tipo Cruz da Santo André (rotula simples) ou rótula dupla, sendo esta última usada em tramos intermédios superiores a 50 m;
- A razão entre as dimensões dos tramos extremos e os intermédios varia entre 0,72 e 0,92;
- A esbelteza, que estabelece a relação entre o vão e a altura da viga, varia entre 8 e 11;
- A escolha do tipo de treliça estava diretamente ligada aos esforços atuantes na ponte. Por exemplo, era sempre utilizada a treliça de rótula dupla para momentos máximos negativos superiores a 200 kN.m, considerando uma carga distribuída de 1 kN/m;
- Constatou-se que na obra da Casa Eiffel era priorizada a compensação dos momentos negativos dos tramos extremos e dos tramos intermédios, sendo quase sempre adotada uma estrutura simétrica.

Considera-se que o trabalho desenvolvido contribui para um melhor conhecimento deste património de conhecimento de engenharia e cultural que é a obra do Gustave Eiffel e da sua Casa. Através de uma análise aprofundada das suas obras foi possível identificar padrões estruturais e conhecer melhor os processos construtivos, as soluções construtivas, os materiais, e as técnicas de dimensionamento implementadas por Gustave Eiffel nas suas obras.

Gustave Eiffel foi um engenheiro-construtor emblemático, cuja obra ficará para sempre ligada ao nascimento da ferrovia e das estruturas metálicas em Portugal.

## **6.2. Desenvolvimentos futuros**

Criação de um acervo técnico (engenharia civil), com os vários tipos dimensionamento, soluções construtivas, etc. utilizados ao longo da história, é essencial para memória futura.

O trabalho desenvolvido poderá ser complementado com estudos futuros como, em primeiro lugar, analisar a condição atual das pontes existentes através de modelação numérica, com recurso a elementos finitos e tendo por base em ensaios realizados em campo, para a definição de modelo estrutural mais fiel possível da condição atual das pontes.

Um outro passo futuro, igualmente importante, é a aplicação da metodologia (BIM - “Building Information Modelling”) para criar um repositório das pontes existentes. Esta ferramenta permite a modelação de toda a informação relevante para o ciclo de vida da construção civil. Podem ser assim integrados num único modelo diversos dados, que além da informação base, relativa ao projeto de engenharia (tipo de elementos, localização, informação



geográfica, propriedades dos materiais, etc.), agrega ainda plano de execução, custos financeiros, informação de manutenção e desmantelamento da estrutura, etc.

Promover uma monitorização em contínuo do estado das pontes existentes, para permitir uma identificação atempada de necessidades de conservação. Esta informação poderá ser integrada automaticamente no modelo BIM de cada ponte [81].

Estudar soluções de reabilitação adequadas, por forma a preservar o património histórico e cultural destas pontes.

Confrontar os resultados obtidos no reconhecimento de padrões com outras obras da Casa Eiffel na Europa e no mundo, para validação dos resultados. Criar uma rede para partilha dessa informação e uma página de divulgação para efeitos didáticos.

Através do levantamento adquirido dos vários processos construtivos, contribuir para um aperfeiçoamento das técnicas de reabilitação, preservando assim o legado da Casa Eiffel e de outros construtores da época que utilizavam técnicas semelhantes.

Dada a importância da conservação da herança patrimonial deixada pela Casa Eiffel em Portugal, considera-se de todo o interesse implementar, nas pontes existentes, sistemas de monitorização e deteção de dano em tempo real. Tanto para as pontes em funcionamento, como durante futuras reabilitações, é importante recorrer às novas tecnologias de monitorização, transmissão e processamento de dados que permitem o acompanhamento do comportamento das pontes [82] [83] [84].

Promover a divulgação do conhecimento adquirido e fomentar a sua apresentação em museus e na própria IP.

Salienta-se que, para Portugal, é da maior importância a preservação das obras de Gustave Eiffel ainda existentes, dado o valor científico, arquitetónico e cultural dessas pontes.



# Bibliografia

- [1] G. Eiffel, *La Tour de Trois Cents Mètres*, Paris: Société des Imprimeries Lemercier, 1900.
- [2] B. Marrey, “Eiffel avant la tour,” *Les Cahiers de Science & Vie*, pp. 22-31, 10 1996.
- [3] H. Azevedo, “Biografia Gustave Eiffel. O mágico do ferro,” *Engenharia e Vida*, vol. 04, pp. 80-83, Julho / Agosto 2004.
- [4] G. Eiffel, “Ponte do Dão,” Companhia dos Caminhos de Ferro Portugueses da Beira Alta. Arquivo Técnico da Infraestruturas de Portugal, Paris, 1879.
- [5] J. H. Saraiva, *História de Portugal*, vol. 6, Lisboa: Alfa, 1985.
- [6] J. Leite, “Inauguração dos Caminhos de Ferro em Portugal,” 30 maio 2011. [Online]. Available: <http://restosdecoleccion.blogspot.pt/2011/05/inauguracao-dos-caminhos-de-ferro-em.html>. [Acedido em 13 04 2018].
- [7] J. Vasconcelos, “A regularização em Portugal: Arte nova, arte degenerada ou arte pobre?,” CEDIPRE, 8 outubro 2004. [Online]. Available: <https://www.fd.uc.pt/cedipre/>. [Acedido em 27 10 2017].
- [8] G. M. Pereira, “Os caminhos-de-ferro do Douro: história e património”.
- [9] Goullard e Nogueira, “Gazeta dos Caminhos de Ferro de Portugal,” [Online]. Available: <http://purl.pt/3367>. [Acedido em 11 2018].
- [10] Infopedia, “Infopedia,” 2018. [Online]. Available: <https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/ponte>. [Acedido em 1 5 2018].
- [11] H. Perneta, “Abordagem sobre a evolução na construção de pontes pontes metálicas,” LNEC, Lisboa, 2010.
- [12] P. P. Gonçalves, “Estudo Prévio de um Tabuleiro em Arco Superior,” Dissertação de Mestrado IST, Lisboa, 2012.
- [13] UNESCO, “Ironbridge Gorge,” Unesco, 2018. [Online]. Available: <https://whc.unesco.org/en/list/371>. [Acedido em 28 abril 2018].

- [14] F. Cavadas, *Monitorização e Análise do Comportamento de Pontes Metálicas Antigas – A Ponte Eiffel*, Porto: Dissertação de Mestrado FEUP, 2008.
- [15] APS, “As Ruas de Lisboa com Alguma Historia,” 27 02 2010. [Online]. Available: <http://aps-ruasdelisboacomhistoria.blogspot.pt/2010/02/rua-de-xabregas-v.html>. [Acedido em 30 04 2018].
- [16] R. Poças, “Gestão do Ciclo de vida de Pontes,” Dissertação de Mestrado Universidade do Minho, Guimarães, 2009.
- [17] A. Reis, “Folhas da Disciplina de Pontes,” IST - Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, Lisboa, 2007.
- [18] “Guideline for Load and Resistance Assessment of Existing European Railway Bridges. Advices on the use of advanced methods.,” Sustainable Bridges, 2007.
- [19] Caminho de Ferro do Minho, “Contrato e caderno de encargos para o fornecimento e montagem dos pilares e superestrutura metallica,” Arquivo Técnico da Infraestruturas de Portugal, Porto, 1876.
- [20] H. Oomori, “Structurae,” 01 09 2010. [Online]. Available: <https://structurae.net/photos/222425-akashi-kaikyo-bridge>. [Acedido em 20 11 2018].
- [21] G. Pilot e J.-L. Bordes, “Ouvrages du génie civil français dans le monde. Ponts et viaducts. 1820-1915,” em *Comité génie civil et bâtiment*, Paris, 2011.
- [22] F. Seitz, Gustave Eiffel, *Le triomphe de l'ingénieur*, Paris: Armand Colin, 2014.
- [23] A. Alter e P. Testard-Vaillant, “L'ascension Calculée d'un bourgeois Provincial,” *Les Cahiers de Science & Vie*, pp. 14-20, 10 1996.
- [24] D. I. Harvie, EIFFEL, *The Genius Who Reinvented Himself*, Stroud, Gloucestershire: The History Press, 2004.
- [25] Wikimedia Commons Contributors, “École centrale Paris,” Wikimedia Foundation, 26 11 2018. [Online]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89cole\\_centrale\\_Paris](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89cole_centrale_Paris). [Acedido em 12 12 2018].

- [26] Wikimedia Commons Contributors, “Bordeaux passerelle Eiffel,” 14 01 2018. [Online]. Available:  
[https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Bordeaux\\_passerelle\\_Eiffel.jpg&oldid=279586924](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Bordeaux_passerelle_Eiffel.jpg&oldid=279586924). [Acedido em 24 11 2018].
- [27] Wikipédia, “Gustave Eiffel,” Wikipédia, a enciclopédia livre., 28 10 2018. [Online]. Available: [https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Gustave\\_Eiffel&oldid=53462528](https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Gustave_Eiffel&oldid=53462528). [Acedido em 29 10 2018].
- [28] F. Q. Abragão, “Os Homens da Ponte Maria Pia,” *Boletim da C.P.*, nº 283, p. 2 a 6, 1953.
- [29] Assembleia da República, “Parlamento,” [Online]. Available: <https://www.parlamento.pt/Parlamento/Paginas/monarquia.aspx>. [Acedido em 25 11 2018].
- [30] n.a., Livro de Óbitos N.º 4, 1877-01-05 / 1891-12-29, Barcelinhos.
- [31] D. I. Harvie, EIFFEL, The Genius Who Reinvented Himself, Stroud, Gloucestershire: The History Press, 2004.
- [32] CP, “Actas da Administração,” *Boletim da C.P.*, nº 281, pp. 21-22, 1952.
- [33] F. Q. Abragão, “Gazeta dos Caninhos de Ferro, n.º1739,” nº 1739, p. 105, 1960.
- [34] J. A. da Graça Barreto, “As nossas gravuras,” *O Occidente*, vol. II, nº 34, p. 78, 1879.
- [35] F. Q. Abragão, “Gazeta dos caminhos de ferro, n.º1740,” nº 1740, p. 119, 1960.
- [36] M. A. Carvalho, “As nossas gravuras,” *O Occidente*, vol. I, nº 14, p. 110, 1878.
- [37] A. Vasconcelos, Pontes Ferroviárias do Alto Minho. Barcelos, Viana do Castelo, Caminha e Valença do Minho, Lisboa: Fundação Caixa Agrícola do Nordeste, 2015.
- [38] P. T. Bento, “caminh@2000,” 14 03 2014. [Online]. Available: <http://www.caminha2000.com/jornal/n675/cmc3.html>. [Acedido em 13 04 2018].
- [39] P. O. Ramos, “Memória da obra de Eiffel em Portugal,” em *Des(a)fiando discursos: Homenagem a Maria Emília Ricardo Marques*, Lisboa, Universidade Aberta, 2005, p. 523 a 531.

- [40] J. Leite, “Restos de Coleção,” 20 06 2010. [Online]. Available: <http://restosdecolecao.blogspot.com/search?q=ponte+dona+maria+pia>. [Acedido em 12 05 2018].
- [41] Compagnie Royale des Chemin de Fer Portugais, “Service de la Voie, contrat pour la reconstruction des trois ponts métallique: Asseca, Almonda, Alviela,” Arquivo Técnico da Infraestruturas de Portugal, Lisboa, 1890.
- [42] M. M. Rodrigues, “Caminho de Ferro do Douro,” *O Occidente*, vol. VII, nº 184, p. 30, 1884.
- [43] M. Azeredo, “Gustavo Eiffel,” 23 02 1998. [Online]. Available: <https://web.fe.up.pt/~azr/pontes/eiffel.htm#Vidaeobra>. [Acedido em 21 02 2018].
- [44] M. M. Rodrigues, “Caminho de ferro do Douro,” *O Occidente*, vol. VII, nº 188, p. 62, 1884 b.
- [45] P. Mêda, “Linha da Beira Alta, A ponte das Várzeas,” *TrainSpotter*, nº 52, pp. 19-22, 2014.
- [46] J. B., “Caminho de ferro da Beira,” *O Occidente*, vol. V, nº 134, p. 203, 1882.
- [47] J. B., “Caminho de ferro da Beira,” *O Occidente*, vol. V, nº 139, p. 246, 1882.
- [48] J. B., “Caminho de ferro da Beira,” *O Occidente*, vol. V, nº 140, p. 255, 1882.
- [49] J. B., “Caminho de ferro da Beira,” *O Occidente*, vol. V, nº 142, p. 270, 1882.
- [50] P. André, “O Viaduto do Côa,” *TrainSpotter*, nº 19, pp. 26-29, 2012.
- [51] E. Júlio, D. Dias da Costa, J. Valença e C. Rebelo, “Caracterização estrutural da Ponte da Praia do Ribatejo sobre o Rio Tejo,” em *ASCP’2011 – 2º Congresso Nacional sobre Segurança e Conservação de Pontes*, Coimbra, 2011.
- [52] CP, “Inauguração da linha entre Santarem e Abrantes,” *Boletim da C.P.*, nº 4, p. 57, 1929.
- [53] CP, “Ponte sobre a Ribeira de Niza,” *Boletim da C.P.*, nº 14, p. 115, 1930.
- [54] L. Mendonça e Costa, “Caminho de Ferro de Lisboa a Cintra,” *O Occidente*, vol. XX, nº 301, p. 99, 1887.

- [55] A. F. Gonçalves, “Renovação dos Tramos Metálicos das Pontes da Linha de Sintra, entre Alcântara e Campolide,” *Gazeta dos Caminhos de Ferro*, nº 1173, p. 512, 1936.
- [56] Google Maps, “Google Maps,” 2018. [Online]. Available: <https://www.google.com/maps/d/edit?hl=pt-PT&mid=1KiRKfyskMlxJ6tUXvM29lcGfcN8&ll=39.50637428725966%2C-8.537279628282135&z=8>. [Acedido em 27 11 2018].
- [57] F. Q. Abragão, “No Centenário dos Caminhos de Ferro em Portugal. Algumas notas sobre a sua história,” *Gazeta dos Caminhos de Ferro*, nº 1652, pp. 472-509, 16 Outubro 1956.
- [58] A. Carvalho e R. Sousa, “A Ponte Eiffel em Viana do Castelo,” 2009.
- [59] J. Appleton, J. Saraiva, R. Moura e F. Rodrigues, “A utilização do aço inox na reabilitação das infraestruturas da Ponte Eiffel sobre o Rio Lima, em Viana do Castelo. Inspeção e Reabilitação,” em *ASCP’09 – 1º Congresso de Segurança e Conservação de Pontes ASCP*, Lisboa, 2009.
- [60] N. Lopes, “Inspeção e Diagnóstico de Pontes Ferroviárias,” em *Encontro 30 anos Engenharia Civil 1986-2016*, Tomar, 2016.
- [61] na, “Centro Histórico do Porto,” Porto Património Mundial 2011 - 2018, [Online]. Available: <https://www.portopatrimoniomundial.com/ponte-maria-pia.html>. [Acedido em 12 12 2018].
- [62] G. Eiffel, “Ponte sobre o Douro, no Porto. Alçado,” *Revista das Obras Públicas e Minas*, 1876.
- [63] Infraestruturas de Portugal, *Ponte Ferroviária do Alviela*, Infraestruturas de Portugal. Direção de Gestão da Rede Ferroviária. Departamento Estruturas Especiais, 2018.
- [64] G. Eiffel, “Reconstruction du pont sur le Tage,” Arquivo Técnico da Infraestruturas de Portugal, Paris, 1886.
- [65] CP, “As nossas pontes,” *Boletim da C.P.*, nº 217 a 222, p. 121, 1947.
- [66] P. Schmitt, “Le viaduc de Garabit,” 02 10 2014. [Online]. Available: <https://www.le-pont.com/wordpress/wp-content/uploads/2017/04/16-Presentation-Patrice-Schmitt-Garabit.pdf>. [Acedido em 20 12 2018].
- [67] G. Ribeill, “Les armes du succès,” *Les Cahiers de Science & Vie*, pp. 32-38, 10 1996.

- [68] “Procédé Triger de fondation par air comprimé,” Wikipédia, 17 05 2018. [Online]. Available:  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Proc%C3%A9d%C3%A9\\_Triger\\_de\\_fondation\\_par\\_air\\_comprim%C3%A9](https://fr.wikipedia.org/wiki/Proc%C3%A9d%C3%A9_Triger_de_fondation_par_air_comprim%C3%A9). [Acedido em 16 11 2018].
- [69] H. Blerzy, “Les Fondations par l’air comprimé,” Wikisource, 30 06 2015. [Online]. Available:  
[https://fr.wikisource.org/wiki/Les\\_Fondations\\_par\\_l%E2%80%99air\\_comprim%C3%A9#](https://fr.wikisource.org/wiki/Les_Fondations_par_l%E2%80%99air_comprim%C3%A9#). [Acedido em 27 09 2018].
- [70] H. Gerard, «La Coupe Schneider et hydravions anciens,» 07 09 2007. [En ligne]. Available: [http://www.hydroretro.net/etudegh/travaux\\_de\\_m\\_%20eiffel.pdf](http://www.hydroretro.net/etudegh/travaux_de_m_%20eiffel.pdf). [Accès le 17 11 2018].
- [71] G. Eiffel, “Pont d’Amonda,” Arquivo Técnico da Infraestruturas de Portugal, Paris, 1889.
- [72] Caminho de Ferro do Minho, “Contrato para a execução da empreitada da Ponte sobre o rio Neiva,” Arquivo Técnico da Infraestruturas de Portugal, Porto, 1877.
- [73] na, “Amélioration des constructions au cours du temps,” [Online]. Available: <http://tpe-phymath.meabilis.fr/toureeiffel/rivetage.html>. [Acedido em 23 09 2018].
- [74] S. Yeatman-Eiffel, “Les brevets d’invention de Gustave Eiffel,” [Online]. Available: <http://www.gustaveeiffel.com/news/page/2>. [Acedido em 11 11 2018].
- [75] Le Minister des Travaux Publics, Circulaire du ministère des travaux publics aux préfets, Versailles, 1877.
- [76] G. Eiffel, Pont sur le Tamêga, Paris: Arquivo Técnico da Infraestruturas de Portugal, n.a..
- [77] G. Eiffel, “Project Viaduc de Trezoi e Viaduc de Milijoso,” G.EIFFEL & Cie. Arquivo Técnico da Infraestruturas de Portugal, Paris, 1879.
- [78] G. Eiffel, “Viaduc du Rio Cris & Viaduc du Rio Coa,” Arquivo Técnico da Infraestruturas de Portugal, Paris, 1879.
- [79] Société Financière de Paris et G. Eiffel et Cie., “Série de Prix,” Arquivo Técnico da Infraestruturas de Portugal, Paris, 1879.
- [80] E. B. Estácio, “Caminhos de ferro em Portugal,” *Gazeta dos Caminhos de Ferro*, pp. 69-70, 1 04 1965.



- [81] M. Alves, P. Carreira e A. Aguiar Costa, “BIMSL: A generic approach to the integration of building information models with real time sensor data,” *Automation in Construction*, vol. 84, 12 2017.
- [82] E. Figueiredo e I. Moldovan, “Merging of model updating and machine learning algorithms for Structural Health Monitoring - Applicability, Challenges, and Opportunities,” Leuven, Belgium, 2017.
- [83] C. R. Farrar, S. W. Doebling e D. A. Nix, “Vibration-based structural damage identification.,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 359, nº 1778, p. 131–149, 2001.
- [84] E. Figueiredo, G. Park, C. R. Farrar, K. Worden e J. Figueiras, “Machine learning algorithms for damage detection under operational and environmental variability,” *Structural Health Monitoring*, vol. 10, nº 6, p. 559–572, 2011.